

VAASAN YLIOPISTO

TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ

SÄHKÖTEKNIikka

Timo Rinne

**SIMULOINTITUTKIMUS ERÄIDEN ENERGIAVARASTOJEN
VAIKUTUKSISTA SÄHKÖVERKKOON**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 25.5.2018

Työn valvoja

Timo Vekara

Työn ohjaaja

Kimmo Kauhaniemi

ALKULAUSE

Tähän diplomityöhön liittyvät simuloinnit on suoritettu Vaasan yliopistossa (VY) alihankintana valtion teknilliselle tutkimuskeskukselle (VTT) toteutetussa projektissa, joka jatkui VY:n ja VTT:n yhteisenä ryhmähankkeena. Varsinainen diplomityö erkani tämän jälkeen hieman erilaisilla tavoitteilla omaksi projektikseen. Osittain tässä työssä esitettyjen simulaatio-ajojen tulokset ovat raportoituina myös kyseisen projektin loppuraporteissa.

Työhön liittyvät varsinaiset simulaatiot ja käytännössä suurin osa kirjoitustyöstä on tehty samanaikaisesti mainitun VTT:n yhteistyöprojektin kanssa vuosina 2005–2006. Työn viimeistely jäi aikanaan kesken ja se on saatettu loppuun kevään 2018 aikana.

Suuret kiitokset projektin johtoryhmälle, työn ohjaajalle sekä valvojalle saamastani tuesta ja palautteesta, sekä perheelle ja läheisille ystäville pitkämielisestä suhtautumisesta ja arvokkaasta tuesta ja kannustuksesta.

Timo Rinne

Vaasassa 25.5.2018

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE.....	2
SISÄLLYSLUETTELO.....	3
LYHENNELUETTELO.....	4
TIIVISTELMÄ.....	5
ABSTRACT.....	6
1 JOHDANTO.....	7
1.1 Tuulivoimala.....	7
1.2 Energiavarastot.....	8
1.3 Sähkönlaatuasema.....	10
1.4 Tavoitteet.....	11
2 MALLINNUS.....	12
2.1 Tuulivoimala ja energiavarasto.....	14
2.2 Sähkönlaatuasema pienjänniteverkossa	15
2.3 Pscad-mallien toteutus.....	16
2.4 Sähkönlaatuaseman malli.....	21
3 TUULIVOIMALA KESKIJÄNNITEVERKOSSA.....	27
3.1 Tuulivoimalan epätahtigeneraattorin suora verkkoonliityntä.....	28
3.2 Taajuusmuuttaja tuulivoimalan verkkoon kytkennässä.....	36
3.3 Energiavaraston sisältävä taajuusmuuttaja tuulivoimalan verkkoon kytkennässä	47
3.4 Energiavaraston ja sähkönlaatuaseman sisältävä taajuusmuuttaja tuulivoimalan verkkoon kytkennässä.....	57
3.5 Yhteenveto tuulivoimalan energiavarastoista.....	61
4 SÄHKÖNLAATUASEMA PIENJÄNNITEVERKOSSA.....	63
4.1 Vika keskijänniteverkossa.....	64
4.2 Viereisen lähdon viat.....	69
4.3 Viereisen muuntamon viat.....	71
4.4 Yhteenveto sähkönlaatuasemasta.....	73
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	74
LÄHDELUETTELO.....	77

LYHENNELUETTELO

DENSY	TEKESin hankeohjelma.
EMTDC	Electro Magnetic Transient Design and Control, sähkömagneettisten transienttien suunnittelu ja hallinta.
ENVADE	Energian varastointi DENSY -hanke.
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier-muunnos.
Pscad	Power System Computer Aided Design, sähköjärjestelmien tietokoneavusteinen suunnittelu; EMTDC:n graafinen käyttöliittymä.
pu	per unit, suhteellisarvo.
RMS	Root Mean Square, neliöllinen keskiarvo; jännitteen ja virran yhteydessä tehollisarvo.
SOC	State of Charge, varaustila
THD	Total Harmonic Distorsion, harmoninen kokonaissärö.
UPS	Uninterrupted Power Supply, keskeytymätön tehonsyöttö.
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
VY	Vaasan yliopisto.

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Tekijä: Timo Rinne

Diplomityön nimi: Simulointitutkimus eräiden energiavarastojen vaikutuksista sähköverkkoon

Valvoja: Professori Timo Vekara

Ohjaaja: Professori Kimmo Kauhaniemi

Tutkinto: Diplomi-insinööri

Oppiaine: Sähkötekniikka

Opintojen aloitusvuosi: 1998

Diplomityön valmistumisvuosi: 2018

Sivumäärä: 79

TIIVISTELMÄ

Tuulivoimaloiden vaihteleva teho aiheuttaa sähköverkossa haitallisia ilmiöitä, kuten esimerkiksi ylijännitteitä ja välkyntää. Energiavarastoilla voidaan vähentää verkkoon syötettävän tehon vaihteluita.

Tämän diplomityön tavoitteena on tarkastella, miten akuilla ja superkondensaattoreilla saadaan vähennettyä tuulivoimalan aiheuttamia jännitteen heilahteluja ja kuinka sähkölaatuasema pystyy korjaamaan jännitekuoppia sekä kompensoimaan yliaaltoja. Tavoitteena myös selvittää säätöalgoritmien vaikutuksia todelliseen sähköverkkoon.

Kohteena on yhteistyönä valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) kanssa eräästä tuulivoimalasta mitattu tehotieto sekä yleisen sähköverkon rakenteen mallit. Kokeellisten mittausten ollessa kalliita ja hankalia toteuttaa suoritettiin tutkimus simuloimalla kirjallisuuden ja yhteistyökumppanien avulla rakennettuja verkkomalleja käyttäen.

Erityisenä tapauksena käsitellään VTT:n energian varastointia koskevaan projektiin Vaasan yliopistossa alihankintana toteutetun simulointiprojektin vaiheita sekä vastaavanlaisen simulointihankkeen toteutusta.

Työssä havaittiin, että energiavarastoiksi lisätyillä superkondensaattoreilla voidaan tasoittaa tehon nopeita vaihteluita, mutta käytännön toteutusta rajoittaa kondensaattorille sallittu suurin virta sekä matala jännite varaustilan ollessa pieni. Akuilla voidaan tasoittaa hitaita tehomuutoksia. Sähkölaatuasema kykeni korjaamaan sähköaseman viereisillä lähdoilla olevien vikojen aiheuttamia jännitekuoppia, kompensoimaan kuorman ottamia virran yliaaltoja sekä toimimaan yhdessä energiavaraston kanssa UPS-laitteen tavoin lyhyissä sähkökatkoksissa. Ohjausparametreissa jouduttiin tekemään kompromisseja tasaisen virran tai tasaisen jännitteen välillä.

AVAINSANAT: Energiavarasto, sähkölaatuasema, tuulivoimala, Pscad, simulointi.

UNIVERSITY OF VAASA
The School of Technology and Innovations
Author: Timo Rinne

Topic of the Thesis: Simulation study of the network influences of an energy storage system

Supervisor: Professor Timo Vekara

Instructor: Professor Kimmo Kauhaniemi

Degree: Master of Science in Technology

Major of Subject: Electrical Engineering

Year of Entering the University: 1998

Year of Completing the Thesis: 2018

Pages: 79

ABSTRACT

The varying effect of wind power plants causes harmful phenomena in the mains supply, such as for example excess voltages and flickering. The energy storages can be used to reduce the variations of the power which is fed to the network.

The objective of this thesis is to examine how the voltage variations caused by the wind power plant can be reduced by the batteries and super capacitors and how the power quality station is able to repair voltage sags and compensate harmonics. Also the studying of the effects of control algorithms on the mains supply was an objective.

The study is based on the production information that has been measured from a wind power plant and the models of the structure of the public electricity distribution systems available as a part of the cooperation with the Technical Research Centre of Finland (VTT). Experimental measurements would have been expensive and difficult to execute a study was performed by simulating network models that have been built with the help of literature and of partners in cooperation.

The stages of the simulation project that has been carried out in the University of Vaasa as subcontracting are dealt with as a special case to the project concerning the storage of the energy of the VTT and realisation to the simulation snow a similar one.

It was found that when super capacitors are added as energy storages they can be used to level down the quick variations of the power but the biggest current allowed to the capacitor and low voltage will restrict practical realisation when the state of charge is low. The slow power changes can be smoothened with the batteries. The power quality station was able to repair the voltage holes caused by the faults on the next starts of the substation, to compensate the harmonics of the current taken by the load and to operate together with the energy storage in short interruptions in the distribution of electricity like UPS device. In the control parameters compromises had to be made between an even current or an even voltage.

KEYWORDS: Energy storage, power quality station, wind power plant, PSCAD, simulation.

1 JOHDANTO

Tämän diplomityön aiheena on tuulivoimaloiden yhteyteen liitettävien energiarastojen tutkiminen. Tarkemmin sanottuna diplomityön tavoitteena on tutkia energiarastojärjestelmien verkkovaikutuksia. Erilaisten vaihtoehtojen yksinkertaisen vertailun mahdollistamiseksi tutkimus on toteutettu simulaatiotutkimuksena. Ensin vertailun lähtökohtana tutkitaan erään tuulivoimalan mittaustietojen perusteella pelkän tuulivoimalan vaikutuksia valitussa sähköverkon simulaatiomallissa. Tämän jälkeen tutkittavana on kaksi erilaista energiarastojärjestelmää:

- energiarasto kytkettynä vaihtosuuntaajan jännitevälipiiriin tuulivoimalassa
- sähköntaatuasema varustettuna energiarastolla.

Työssä käytetään Pscad-simulointiohjelmaa, joka on tarkoitettu erityisesti nopeiden muutostilmiöiden tarkasteluihin. Simulointityössä hyödynnetään Vaasan yliopiston (VY) ja valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) aikaisemmissa yhteisissä projekteissa tehtyjä sähköverkkojen simulaatiomalleja. Tähän työhön on valittu tyypillinen keskijännitteinen avojohtoverkko, johon lisätään tuulivoimala. Toisena mallina käytetään tyypillistä pienjännitteistä maakaapeliverkkoa, johon lisätään sähköntaatuasema.

1.1 Tuulivoimala

Tuulivoimalasta saatava teho on voimakkaasti riippuvainen tuulennopeudesta. Tyypillisesti tuulennopeus vaihtelee, toisaalta hitaasti pitkäaikaiselta keskiarvoltaan ja toisaalta nopeasti puuskien ja turbulenssien vaikutuksesta. Tuulivoimalan vaikutus heikossa jakeluverkossa näkyy lähinnä jännitteen nousuna tuulivoimalan liityntäpisteessä. Tuulivoimala näkyy verkkoon päin negatiivisena kuormituksena. Verkon ominaisuuksista riippuu, kuinka paljon jännite milläkin tehotasolla nousee. Pitkän tuulettoman tai vähätuulisen jakson aikana tarvitaan tehonsyöttöä muuta kautta. Syöttötehon suuruuden ja suunnan vaihtelu monimutkaistaa sähköverkon säädön ja suojauksen rakennetta. Tässä tutkimuksessa energian varastointia käytetään tasaamaan

toisaalta tehon äkillisiä heilahteluita, toisaalta pitkän aikavälin tehotaseita niin, että tuulivoimalasta saadaan verkkoon mahdollisimman tasaista tehoa.

1.2 Energiavarastot

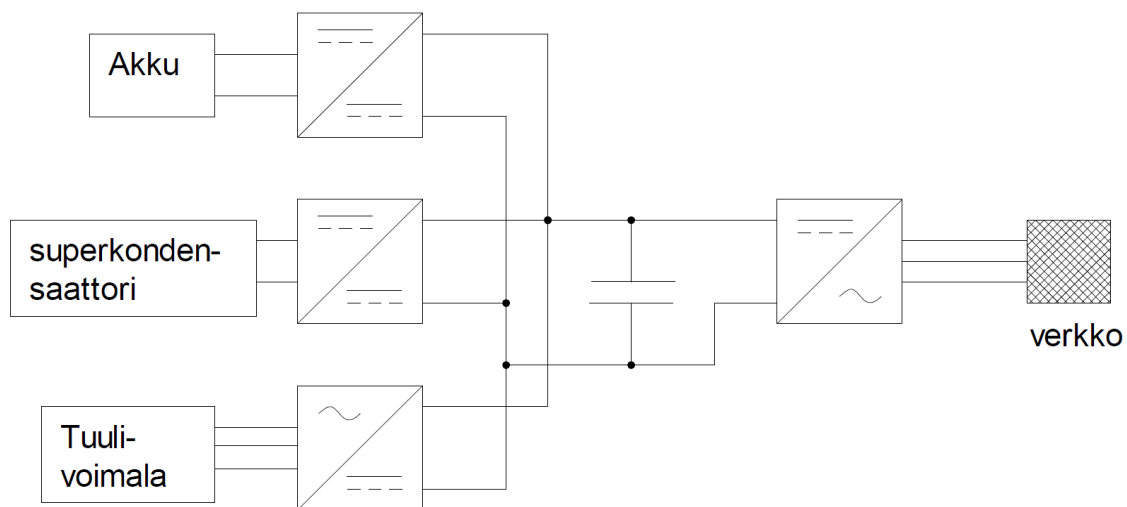
Energian varastointia koskevia tutkimuksia on vuosien varrella julkaistu monia. Viimeisen 20 vuoden aikana erityisesti sähköverkkoon liitetyt tuulivoimalat ovat lisänneet keskustelua energian varastoinnista sekä sähkön laadusta. Kattava katsaus erilaisiin energian varastointitapoihin sekä niiden ominaisuuksiin löytyy VTT:n tiedotteesta *Energian varastoinnin nykytila* (Alanen, Koljonen, Hukari & Saari 2003). Tämän diplomityön taustalla olevan projektin loppuraportin lukemalla voi saada laajemman kokonaiskuvan energian varastoinnista hajautetussa sähkönjakelussa (Alanen, Hätönen, Kallunki, Ikäheimo, Knuuttila, Holma, Kauhaniemi, Saari & Rinne 2006).

Useassa tieteellisessä julkaisussa on esitetty lyhyen ja pitkän aikavälin energia-varastojen yhdistämistä. Tällöin lyhyen aikavälin varastosta voidaan tehdä nopeita korjauksia, kun taas pitkän aikavälin varastoa tarvitaan kattamaan pitempiäaikaisia tehovajeita tai vastaavasti varastoimaan hetkellistä ylituotantoa. Monessa julkaisussa ei ole otettu kantaa energiavarastojen teknisestä toteutuksesta, tai on esitetty esimerkkeinä vauhtipyörät (Strunz & Nedrud 2005) ja vesivarastot (Leonhard ym. 2004) tai vetytalouteen liittyvät ratkaisut (Yu & Strunz 2004).

Tässä tutkimuksessa keskitytään kuitenkin siis perinteisten lyijyakkujen ja superkondensaattoreiden yhdistelmään. Energian varastoinnilla saavutettavia tasauksen periaatteita on esitetty jo vuonna 1995 (Tsai, Lin, Tsai & Huang 1995). Energiavarastojen liittämistä tuulivoimalaan on sivuutettu monissa lähteissä. Suoraan aiheeseen viitataan mm. lähteissä (Holma 2005) ja (Abbey & Joós 2004). Eri energiavarastojen ominaisuuksien perusteella voidaan päätellä, mihin niitä kannattaa käyttää. Esimerkiksi akkuja ei voi mielivaltaisen nopeasti purkaa eikä ladata, joten niillä ei pystytä tasaamaan kaikkein nopeimpia suuren tehon heilahteluita. Useita eri energian varastointitapoja käsitellään lähteessä (Ribeiro, Johnson, Crow, Arsoy & Liu 2001).

Energiavarastojen mitoitukseen on otettu laajemmin kantaa lähteissä (Lund & Paatero 2006), (Abbey & Joos 2005) ja (Lee & Chen 1995). Mitoitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. tavoiteltu jännitteen tasaisuus, pisin pelkistä varastoista nimellisteholla syötettävä ajanjakso ja tuulivoimalan nimellisteho. Lähteessä (Lund ym. 2006) on myös tutkittu energiavarastojen jännitteen nousua vähentävää vaikutusta.

Energiavarastoja voidaan ohjata toimimaan myös siten, että saavutetaan tasapaino verkon kuormitustilanteiden kanssa tai saavutetaan hintahyöty energian hinnan vaihdellessa. Käytännössä tuulivoimalan tapauksessa 1990-luvun akkutekniikoilla ei ole taloudellisesti kannattavaa kasvattaa energiavarastojen kokoa niin suuriksi, että voitaisiin suuressa määrin hyötyä energian hinnan muutoksista. Varastointia voidaan kuitenkin harjoittaa suuressa mittakaavassa esimerkiksi pumppaamalla vettä halvan energian aikana vesivoimalan yläpuolelle varastoon (Leonhard & Grobe 2004), mutta tällaisia sovelluksia ei käsitellä tässä työssä tämän tarkemmin. Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva taajuusmuuttajan välipiiriin kytkettävistä energiavarastoista.



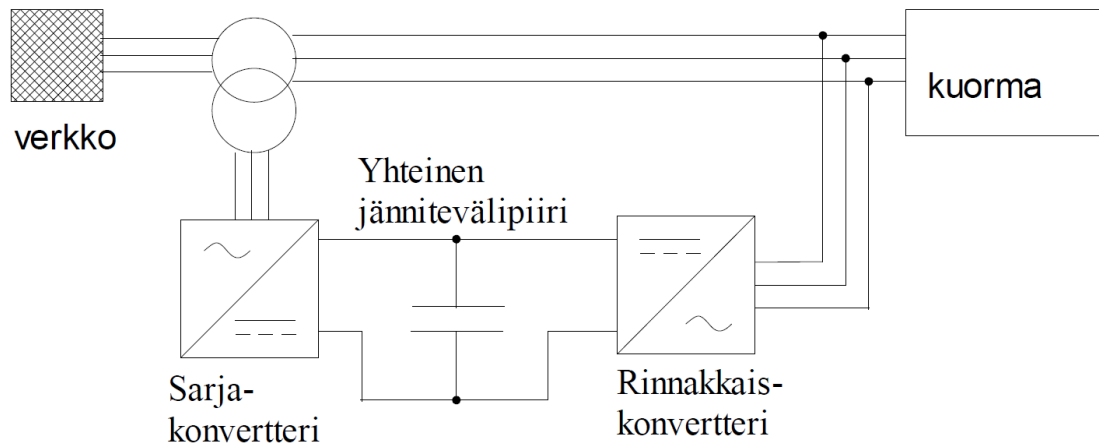
Kuva 1. Periaatekuva tuulivoimalan taajuusmuuttajan välipiiriin kytkettävistä energiavarastoista.

1.3 Sähkönlaatuasema

Jännitteen liiallisen nousun lisäksi toinen merkittävä sähköverkossa esiintyvä häiriö on jännitekuopat. Näitä syntyy mm. oikosulkujen ja muiden vastaavien virtapiikkien seurauksena viereisten muuntamoiden asiakkaille. Näiltä ei sähkö katkea kokonaan, kuten oikosulun sisältäneessä haarassa, mutta jännite saattaa laskea hetkellisesti jopa puoleen normaalista arvosta. Monille asiakkaille tällainen alle sekunnin kestävä jännitekuoppa saattaa aiheuttaa suurta haittaa. Toisaalta jotkut sähkönkuluttajat vaativat ehdottoman särötöntä jännitettä tai aiheuttavat virtaan melkoisesti yliaaltoja. Tällaisia tapauksia varten sähkönlaatuasema on perusteltua sijoittaa sähköverkkoon, joko asiakaskohtaisesti tai keskitetysti useampaa asiakasta palvelemaan. Standardissa SFS-EN 50160 on määritetty yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuuksia ja raja-arvoja.

Aktiivisuodattimen periaatteita on esitetty vuonna 1998 esimerkiksi lähteessä (Peng 1998). Siinä on esitetty sarja- ja rinnakkaissuodattimia sekä vertailtu niitä toisiinsa. Tässä tutkimuksessa tuulivoimalan yhteyteen alaluvussa 3.4 lisätyssä yliaaltokompensoinnissa käytetään topologiaan rinnakkaissuodatinta. Rinnakkaissuodattimessa käytännössä mitään erillistä laitetta ei lisätä, vaan lisäys koskee pelkästään vaihtosuuntaajan ohjausta. Luvun 4 sähkönlaatuasemassa käytössä on sekä sarjakompensointi jännitteen tasoittamiseksi että rinnakkaiskompensointi virran yliaaltojen syöttämiseksi ja saarekekäyttöä varten. Sarjakompensointi vaatii käytännössä perustaajuusmuuttajan lisäksi myös muuta laitteistoa, kuten erikoisvalmisteisen muuntajan.

Sähkönlaatuaseman ja energianvaraston yhdistelmällä saadaan toteutettua tietokoneiden yhteydessä jo pitkään tunnettu keskeytymätön tehonsyöttö toiminto (UPS). Tapauskohtaisesti pitää erikseen mitoittaa energiavarastojen sekä sähkönlaatuaseman koot vastaamaan asiakkaiden tarpeisiin. Tässä työssä ei oteta yksityiskohtaisesti kantaa energianvarastojen mitoitukseen. Kuvassa 2 on esitetty sähkönlaatuaseman periaatteellinen kytkentäkaavio. Samalla periaatteella toimiva sähkönlaatuasema on käytössä sekä alaluvussa 3.4 (vain rinnakkaiskonvertteri eli yliaaltojen aktiivisuodatin) että luvussa 4 (sekä sarja- että rinnakkaiskonvertterit).



Kuva 2. Periaatekuva sähkönlaatuasemasta. Jännitevälipiiriin voidaan kytkeä lisäksi energiavarasto UPS-toiminnan mahdollistamiseksi.

1.4 Tavoitteet

Tässä tutkimuksessa on tavoitteena tarkastella ENVADE-hankkeessa (Alanen & Hätönen 2006) kehitettyjen energiavarastojärjestelmien verkkovaikutuksia; miten akuilla ja superkondensaattoreilla saadaan vähennettyä tuulivoimalan aiheuttamia jännitteen heilahteluja, ja kuinka sähkönlaatuasema pystyy korjaamaan jännitekuoppia sekä kompensoimaan yliaaltoja. Tavoitteena on myös selvittää malliin rakennettujen säätöalgoritmien vaikutuksia todelliseen sähköverkkoon.

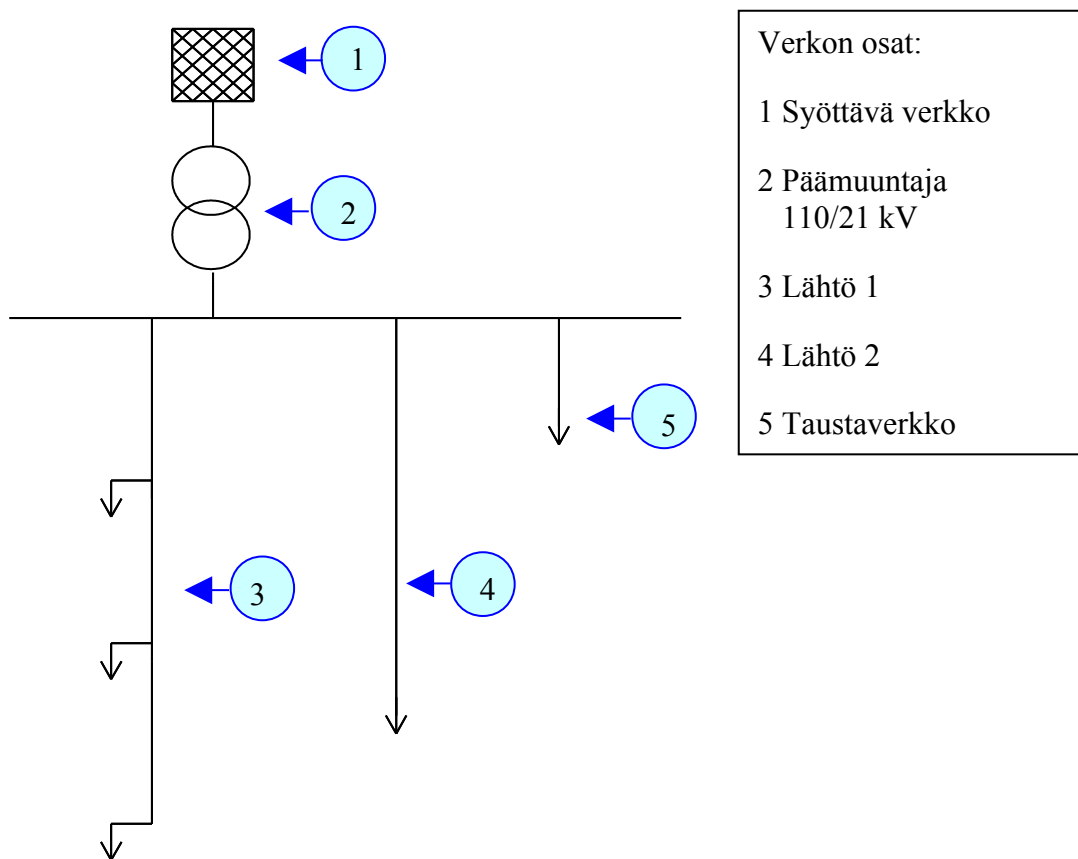
Energiavarastoja kuvaavat mallit sijoitetaan verkkomalleihin, joita on kehitetty aiemmin VY:n Simulointiympäristö-hankkeessa. Verkkomalleja joudutaan osin muokkaamaan tarkoituksenmukaisen rakenteen ja laajuuden aikaansaamiseksi. Energiavarastoja kuvaavat simulointimallit toimitti VTT.

Järjestelmää kuvaavilla simulointimalleilla tehdään erilaisia tilanteita vastaavat simulointiajot, joissa mitataan verkon eri osissa virtoja ja jännitteitä sekä erikseen määritellyt näistä laskennallisesti saatavat suureet, kuten esimerkiksi jännitteen kokonaissärö, total harmonic distortion (THD).

2 MALLINNUS

Jotta asetettuja tavoitteita voitaisiin alkaa tutkia simuloimalla, tarvitaan aluksi mallit todellisuudesta. Tavoitteena on tutkia kahta eri kohdissa verkkoa toimivaa energia-varastoja sisältävää laitteistoa. Ensinnäkin tuulivoimalan yhteyteen keskijännite-verkkoon ja toiseksi sähkönlaatuasemalle pienjänniteverkkoon sijoitettavaa energia-varastoa ja näiden verkkovaikutuksia.

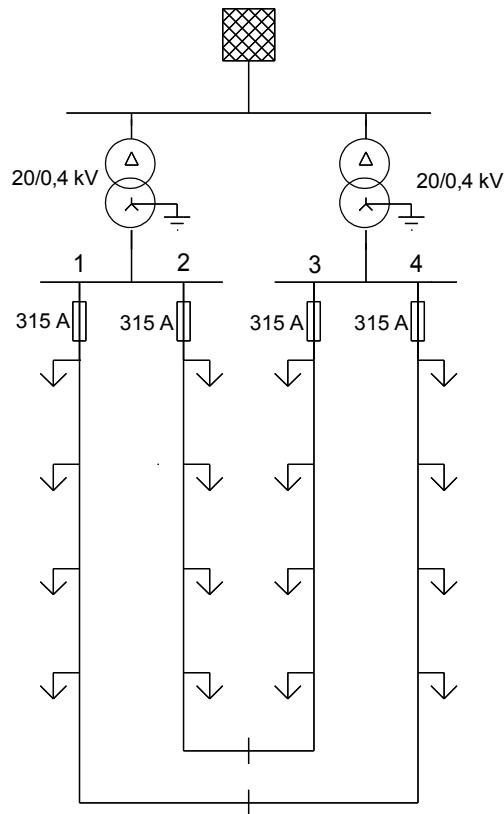
Tuulivoimalaan sijoitettavan energiavaraston simuloinneissa käytetään keskijännite-verkkomallia (20 kV), joka edustaa tyypillistä suomalaista avojohtoverkkoa. Mallin rakenne on esitetty kuvassa 3. Päämuuntaja on kooltaan 16 MVA. Yksityiskohtai-semmin kuvatun lähdön 1 pituus on 50 km. Lähdön 2 pituus on 35 km.



Kuva 3. Keskijänniteverkko, jota mallinnetaan.

Sähkönlaatuaseman yhteydessä käytetään tyypillistä kaupungin jakeluverkkoa kuvaavaa pienjänniteverkkomallia, joka perustuu rengasyhteyksin varustettuihin maakaapeleihin.

Jakelumuuntajat ovat kooltaan 800 kVA. Lähtöjen pituudet ovat 400 m ja niillä on jakokaapit (kuormat) 100 m välein. Jakokaapit on merkitty kuvaan 4 alaspäin osoittavilla nuolilla.



Kuva 4. Pienjännitteinen maakaapeliverkkomalli.

Tarkasteltavat varastoratkaisut liitetään edellä esitettyihin verkkomalleihin, joista tehdään simulointeja varten tarpeellinen määrä eri versioita tarkasteltavien tilanteiden perusteella. Keskijänniteverkon mallia yksinkertaistetaan siten, että suhteellisen pitkää aikaväliä koskevan simulointiajon aika saadaan lyhyemmäksi ilman, että yksinkertaistuksilla on vaikutusta tarkasteltaviin tuloksiin. Tämän tyyppiset yksinkertaistukset ovat erityisesti tarpeen suuntaajia sisältävissä simuloinneissa, jotka edellyttävät riittävän lyhyen laskenta-aika-askeleen käyttöä suhteessa suuntaajan kytkentätaajuuteen.

2.1 Tuulivoimala ja energiavarasto

Tavoitteena on tarkastella keskijänniteajohtoverkossa (suhteellisen heikko verkko) noin 1 MW:n tuulivoimalaa ja siihen sijoitettavia erilaisia energiavarastoratkaisuja. Generaattorimallina käytetään aiemmin mallinnettua 1,65 MW epätahtigeneraattoria, vaikka simuloinnissa käytetyt tehotiedot ovat ilmeisesti peräisin 1 MW voimalasta. Verkkovaikutusten kannalta generaattorimallin nimellisteholla oletetaan kuitenkin olevan vain vähäinen vaikutus, koska simuloinneissa tarkastellaan normaalitilannetta, jossa loisteho on lähes täysin kompensoitu. Verkkovaikutuksina tarkastellaan jännite-tason muutoksia johtolähdöllä ja yliaaltojen leviämistä verkossa. Yliaaltolähteenä käytetään tuulivoimalaan 690 V jännitteeseen kytkeytyvää yliaaltopitoista kuormaa (100 kW).

Tehtävänä on tarkastella seuraavia tilanteita:

- epätahtigeneraattori, suoraan verkkoon kytketty (A)
- epätahtigeneraattori, taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketty (B)
- epätahtigeneraattori, taajuusmuuttajan ja energiavaraston avulla verkkoon kytketty (C)
- epätahtigeneraattori, sähkönlaatuaseman kanssa verkkoon kytkettynä (D).

Käytännössä nämä tilanteet vaativat neljän eri mallin toteuttamisen. Verkon osalta mallit ovat samanlaiset, vain tuulivoimalan toteutuksessa on eroja. Tilanteiden B–D mallinnuksen toteutuksessa jätetään generaattorin tyyppi avoimeksi, koska sillä ei ole oleellisesti merkitystä verkon kannalta taajuusmuuttajan ollessa käytössä. Käytännössä tehojen mittaustulokset olisivat varmasti toisenlaiset tahtigeneraattorilla, joten siinä mielessä nämä suoritettut simulaatio-ajot kattavat kuitenkin vain epätahtigeneraattorin tapauksen tilanteessa A.

Simuloinneissa mitataan seuraavat suureet:

1. Tuulivoimalalla

- generaattorin pätö- ja loisteho

- energiavaraston pätö- ja loisteho
- pätö- ja loisteho verkkoon
- jännite liityntäpisteessä
- yliaallot

2. Jännite kohteena olevalla kuluttajalla

- hetkellisarvo
- tehollisarvo
- yliaaltospektri
- jännitteen THD.

Näiden lisäksi simulointimalleissa on myös joitain muita mallin oikean toiminnan varmistamiseen tarvittavia mittauksia.

2.2 Sähkönlaatuasema pienjänniteverkossa

Energiavarastolla varustetun sähkönlaatuaseman verkkovaikutuksia tutkitaan liittämällä laatuasema osaksi tyypillistä pienjännitejakeluverkkoa. Tässä mallissa laatuasema sijoitetaan muuntamolle häiriöitä tuottavan kuorman sisältävän lähdon alkuun. Kyseessä on suurehko suuntaajakuorma. Simuloinneissa tutkitaan myös laatuaseman käyttäytymistä muualla verkossa olevissa vikatilanteissa. Käytännössä niistä aiheutuu jännitekuoppia, jotka laatuasema pystyy korjaamaan. Energiavarasto mahdollistaa hyvinkin syvien jännitekuoppien eliminoinnin (UPS toiminto). Simulointien avulla on tarkoitus verkkovaikutusten lisäksi kerätä perustietoja sähkönlaatuaseman mitoitusperiaatteista.

Simuloinneissa mitataan seuraavat suureet:

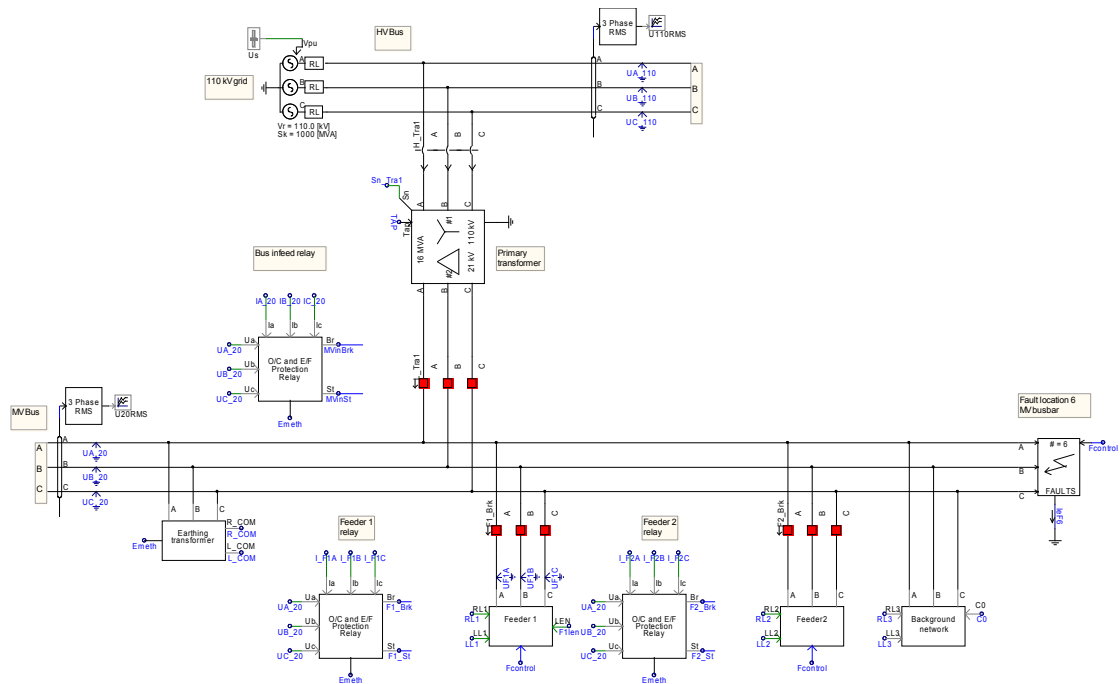
- jännitteen tehollisarvo, hetkellisarvo ja spektri
 - ennen laatuasemaa ja laatuaseman jälkeen
- virran hetkellisarvo ja spektri
 - ennen laatuasemaa ja laatuaseman jälkeen

- laatuaseman energiavaraston syöttämä energia
- verkon jännitteen spektri verkon eri osissa.

Näiden lisäksi simulointimalleissa on myös joitain muita mallin oikean toiminnan varmistamiseen tarvittavia mittauksia.

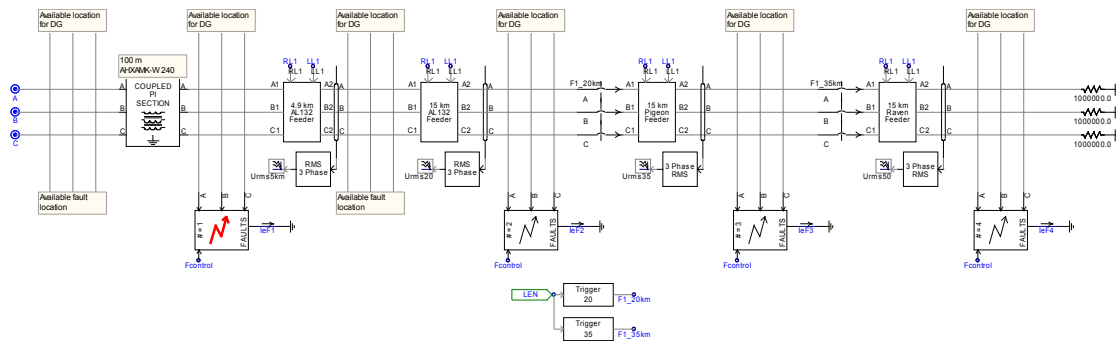
2.3 Pscad-mallien toteutus

Keskijänniteverkkomallin lähtökohtana käytetään kuvassa 5 näkyvää verkkomallia, jonka periaatteellinen yksiviivakaavio on esitetty tämän luvun alussa kuvassa 3.



Kuva 5. Keskijänniteverkon Pscad-malli. Tuulivoimala on lisätty lähtöön 1 (Feeder 1).

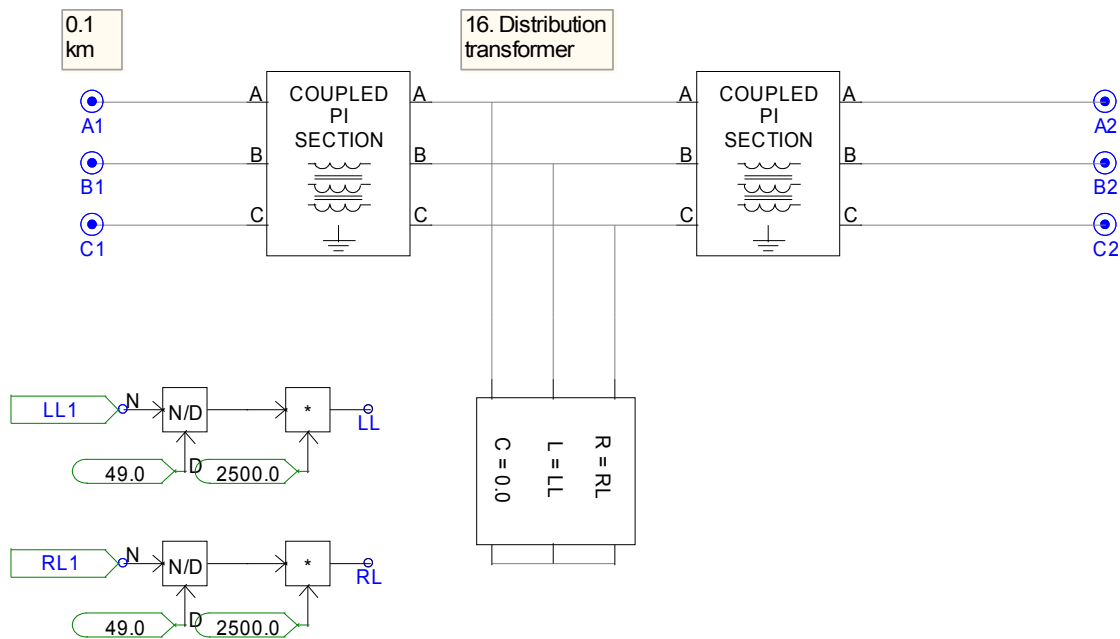
Tätä mallia yksinkertaistetaan siten, että tarkasteltavan lähdön keskellä olevien solmu-pisteiden määrää vähennetään niin, että kytkentä säilyy lähdön alussa ja lopussa sähköisiltä ominaisuuksiltaan ekvivalenttisenä. Kuvassa 6 nähdään alkuperäisen mallin eri johto-osuuksien malleja neljä kappaletta, kukin merkittyinä johto-osuuden pituudella, kaapilityypillä sekä lopuksi tekstillä ”Feeder”.



Kuva 6. Keskijännite-avojohtoverkon Pscad-mallin lähdön 1 (Feeder 1) osuus ennen muokkausta.

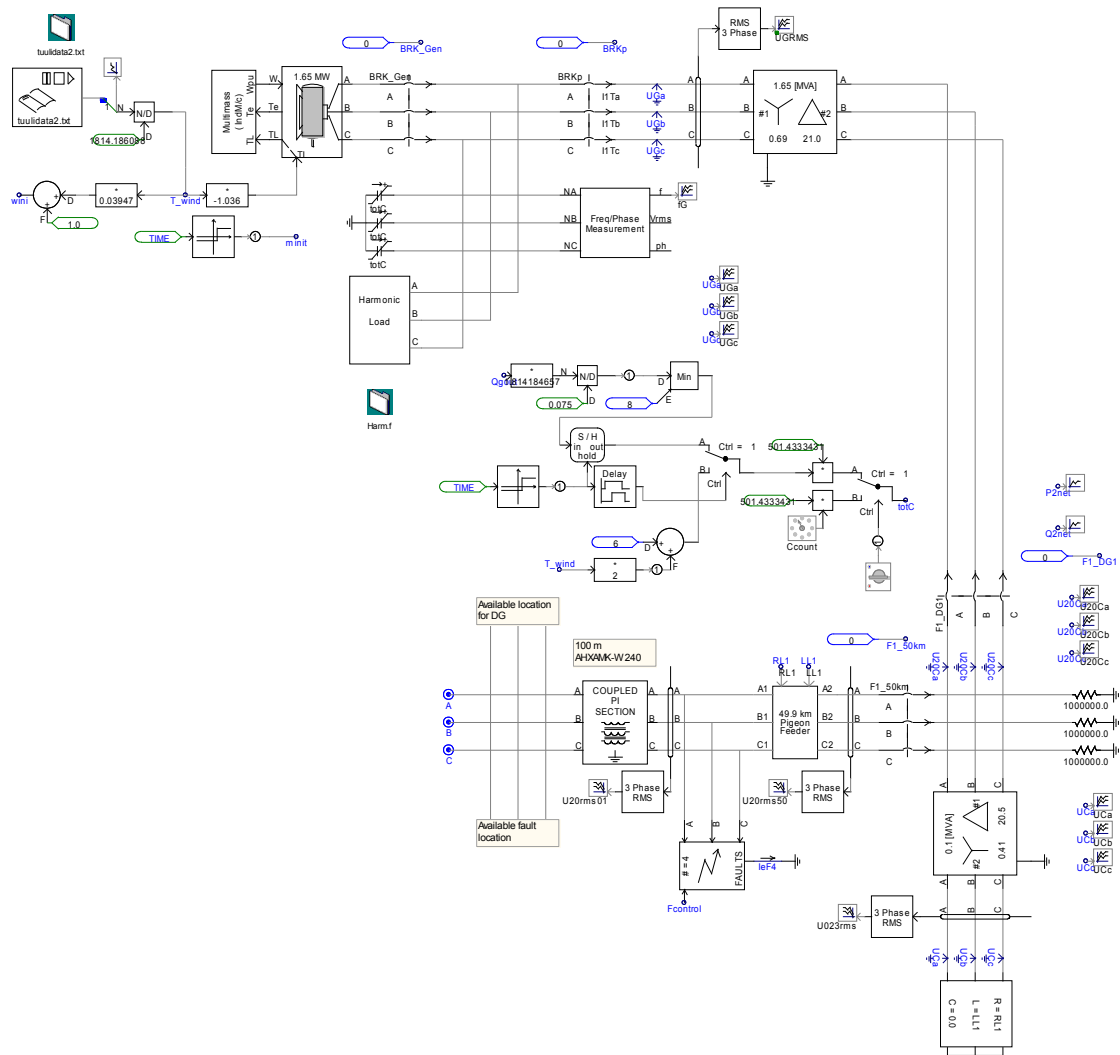
Alkuperäisessä yksityiskohtaisessa keskijännitteisen avojohtoverkon Pscad-mallissa oli peräkkäin useita erityyppisiä kaapeliosuuksia, joissa jokainen jakelumuuntajalähtö oli kuvattu erikseen. Kuvassa 7 on esitetty yhden johto-osuuden mallin sisältö. Alkuperäisessä mallissa oli kuvattu myös yksittäiset jakelumuuntajat, joita oli sijoitettu johto-osuuksille 1 kilometrin välein. Koko lähdön kuormitus oli laskettu tasaisesti jakautumaan jokaiselle jakelumuuntajalle. Lähdön kuormitusparametrit voidaan syöttää Pscad-mallin käyttöliitymästä suoraan.

Koska tässä simulaatiossa ei olla kiinnostuneita jokaisen kuluttajan jännitteen ja virran käyttäytymisestä erikseen, yksinkertaistetaan mallia tältä osin. Yksinkertaistuksessa päädyttiin käyttämään yhtä yleisintä keskijänniteavojohtotyyppiä Pigeonia, sekä erilliset kuormat ja jakelumuuntajat yhdistettiin laskennallisesti ekvivalentiksi kuormaksi keskelle johto-osuutta kuvan 8 mukaisesti. Yksinkertaistuksen vaikutukset johdon alku- ja loppupäihin varmistettiin vielä erillisillä simulaatioajoilla.



Kuva 8. Muutetun mallin lähdön 1 ainoan kuormia sisältävän johto-osuuden kuvaus.

Tuulivoimalaa lähinnä oleva jakelumuuntaja kuvataan kuitenkin erikseen tuulivoimalaa lähimpänä olevan kuluttajan sähkön laadun tarkempaa tarkastelua varten. Tuulivoimala lisätään lähdön 1 päähän kuvan 9 mukaisesti. Tuulivoimalan malli sisältää syöttömuuntajan 0,69/21 kV sekä epätahtigeneraattorin ohjauspiireineen ja kompensointikondensaattoreineen. Tuulivoimalan generaattorimallia pyörittävä momenttiohje (pu) lasketaan mallissa erillisestä tiedostosta luettavasta tehotiedosta (kW).



Kuva 9. Keskijännite-avojohtoverkon Pscad-mallin lähdön 1 osuus tuulivoimalan lisäyksen ja solmupisteiden lukumäärän vähentämisen jälkeen.

Tuulivoimalalle sijoitetaan 690 V puolelle yliaaltokuorma, jonka teho on vakio 100 kVA. Sen yliaaltojakauma parametroidiin kuvassa 10 esitetyllä tavalla. Jakauma kuvaa lähinnä tyypillistä teollisuuslaitoksen yliaaltokuormaa (Uusi-Ranta 2001).

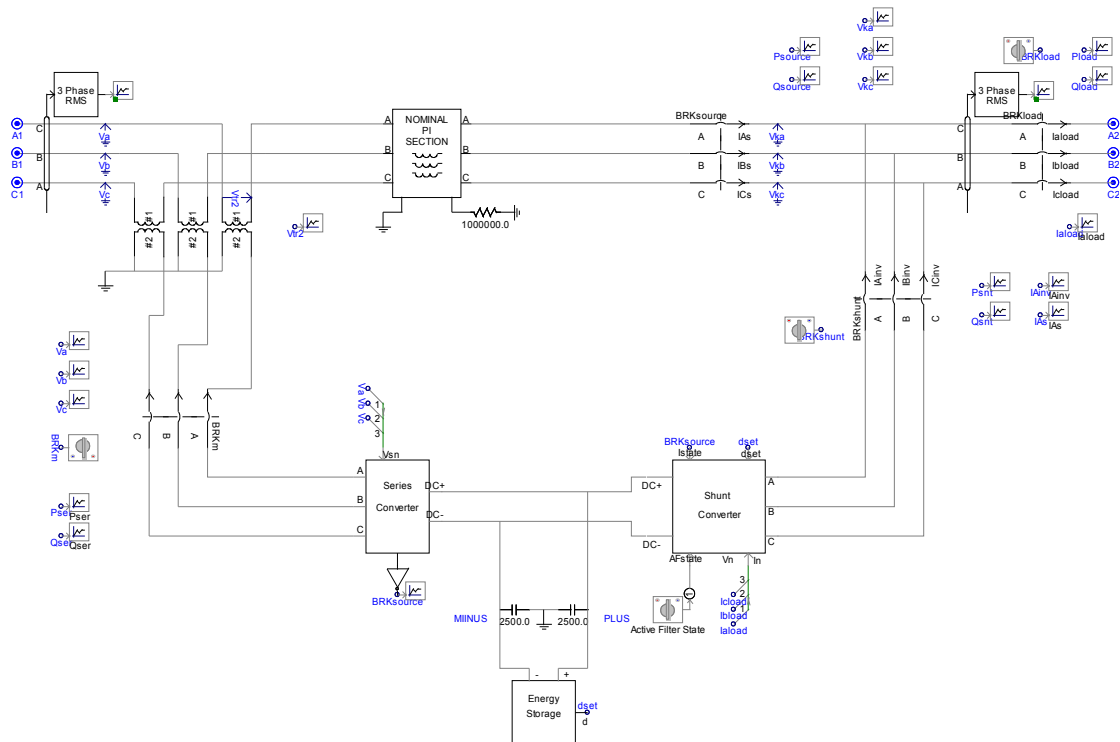
The screenshot shows a software window titled "[Harm_gen]" with a close button in the top right corner. Below the title bar is a dropdown menu labeled "Harmonics (relative)". The main area contains a table with two columns: "No." and "Magnitude". The table lists harmonic orders from 3 to 33. The magnitudes are: 0.1 for order 3, 0.25 for order 5, 0.09 for order 7, 0.07 for order 11, 0.03 for order 13, and 0 for orders 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, and 33. At the bottom of the window are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

No.	Magnitude
3	0.1
5	0.25
7	0.09
11	0.07
13	0.03
15	0
17	0
19	0
21	0
23	0
25	0
27	0
29	0
31	0
33	0

Kuva 10. Tuulivoimalan 690 V jännitteeseen kytketyn yliaaltopitoisen 100 kVA induktiivisen kuorman suhteelliset yliaaltopitoisuudet.

2.4 Sähkönlaatuaseman malli

Diplomityössä (Hätönen 2005) esitetyn sähkönlaatuasemakonseptin mukainen simuloimallimalli on esitetty kuvassa 11. Mallin alkuperäinen versio on kehitetty VTT:llä käyttäen mm. lähteitä (Hu & Chen 2000) ja (Fujita & Akagi 1996), joissa on yksityiskohtaisesti kuvattu laitteen toimintaperiaatteita ja säätötapoja. Kyseisissä viitteissä sähkönlaatuasemaan ei sisällynyt jännitevälipiiriin kytkettäviä energiavarastoja eikä niitä myöskään ollut valmiiksi kytkettynä VTT:n toimittamaan malliin.



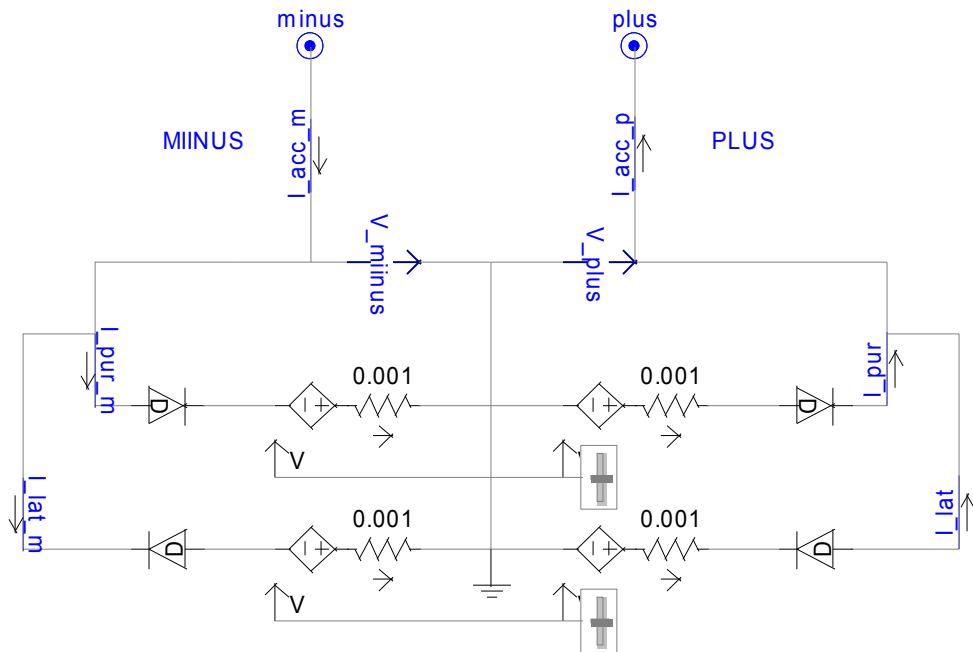
Kuva 11. Sähkönlaatuaseman Pscad-malli.

Kun välipiirissä on vain kondensaattoreita, pystyy sähkönlaatuasema korkeintaan paikkaamaan verkossa esiintyviä jännitekuoppia. Energiavarastoilla sähkönlaatuasemaan saadaan tavallaan UPS-toiminto. Käytettävissä olivat konseptiin kuuluvien energiavarastojen, superkondensaattorin ja akun mallit, mutta niitä ei sisällytetty tähän sähkönlaatuaseman malliin sellaisenaan. Energiavaraston olemassaolo toteutettiin varustamalla jännitevälipiiri geneerisellä energiavaraston mallilla, joka perustui jännitelähteen malliin. Mittaamalla jännitelähteen vastaanottamat ja syöttämät tehot ja energiat saatiin alustavaa tietoa käytettävien energiavarastojen mitoituksen perustaksi. Tehtyjä simulointeja voidaan käyttää myös lähtökohtana mietittäessä energiavarastojen ohjausperiaatteita tällaisessa konseptissa.

VTT:n toimittamaan sähkönlaatuaseman malliin tehtiin useita muutoksia, jotta se saatiin toimimaan sähköverkon osana tarkasteltavien tilanteiden kannalta järkevällä tavalla. Muuntajan avulla sarjaan kytketyn vaihtosuuntaajan avulla tavoitteena on korjata syöttävässä jännitteessä esiintyvät jännitehäiriöt, lähinnä jännitekuopat. Muuntaja on suuntaajan puolelta mallissa tähtikytkentäinen, joten jännitevälipiirin keskipiste piti

myös maadoittaa. Tämä mahdollistaa myös syöttävän jännitteen nollakomponentin eliminoinnin. Alkuperäisessä mallissa muuntajan muuntosuhde oli 240/240 V, mutta se muutettiin arvoon 240/46 V. Tämän perusteena oli ajatus, että sarjakytkenällä korjataan vain enintään 20 % jännitekuopat. Tätä suuremmat kuopat laatuasema tulkitsee katkoiksi, jolloin tehonsyötöstä vastaa rinnan kytketty suuntaaja. Malliin rakennettiin automatiikka, joka hoitaa tämän syöttötilan muutoksen. Normaalitilanteessa sarjaan kytketty suuntaaja toimii aktiivisuodattimena ja lataa samalla energiavarastoa. Lisäksi malliin tehtiin joitain muutoksia säätäjiin niin, että suuntaajien toiminta saatiin alkuperäistä huomattavasti paremmaksi. Aktiivisuodattimella verkon puolella ei voi olla kovin paljon suodatusta, mutta taas UPS-käytössä syötön kunnollinen toiminta edellyttää verkon puolelle kytkettäviä kapasitansseja. Ongelma ratkaistiin mallissa kytkimellä, joka ohjaa suuntaajan napojen kapasitanssien päälle tai pois kytkennän toimintatilan mukaan.

Välipiirissä olevan energiavaraston malli toteutettiin käyttämällä kuvassa 12 esitetyllä tavalla useampaa jännitelähdettä kytkettynä diodien kanssa sarjaan. Jännitelähteet säädettiin siten, että varasto syötti virtaa välipiiriin kun välipiirin jännite laski alle 340 V. Vastaavasti jännitelähteitä ”ladattiin” kun välipiirin jännite ylitti 380 V. Sarjaan kytketyn suuntaajan tehonsäätö viritettiin niin, että näihin energiavarastoihin ei syötetä energiaa pitkällä aikavälillä. Lyhyellä aikavälillä varasto kuitenkin jatkuvasti tasaa välipiirin jännitettä ja tästä syntyy piirissä noin 50 kW häviöt, jotka otetaan suuntaajan kautta verkosta.

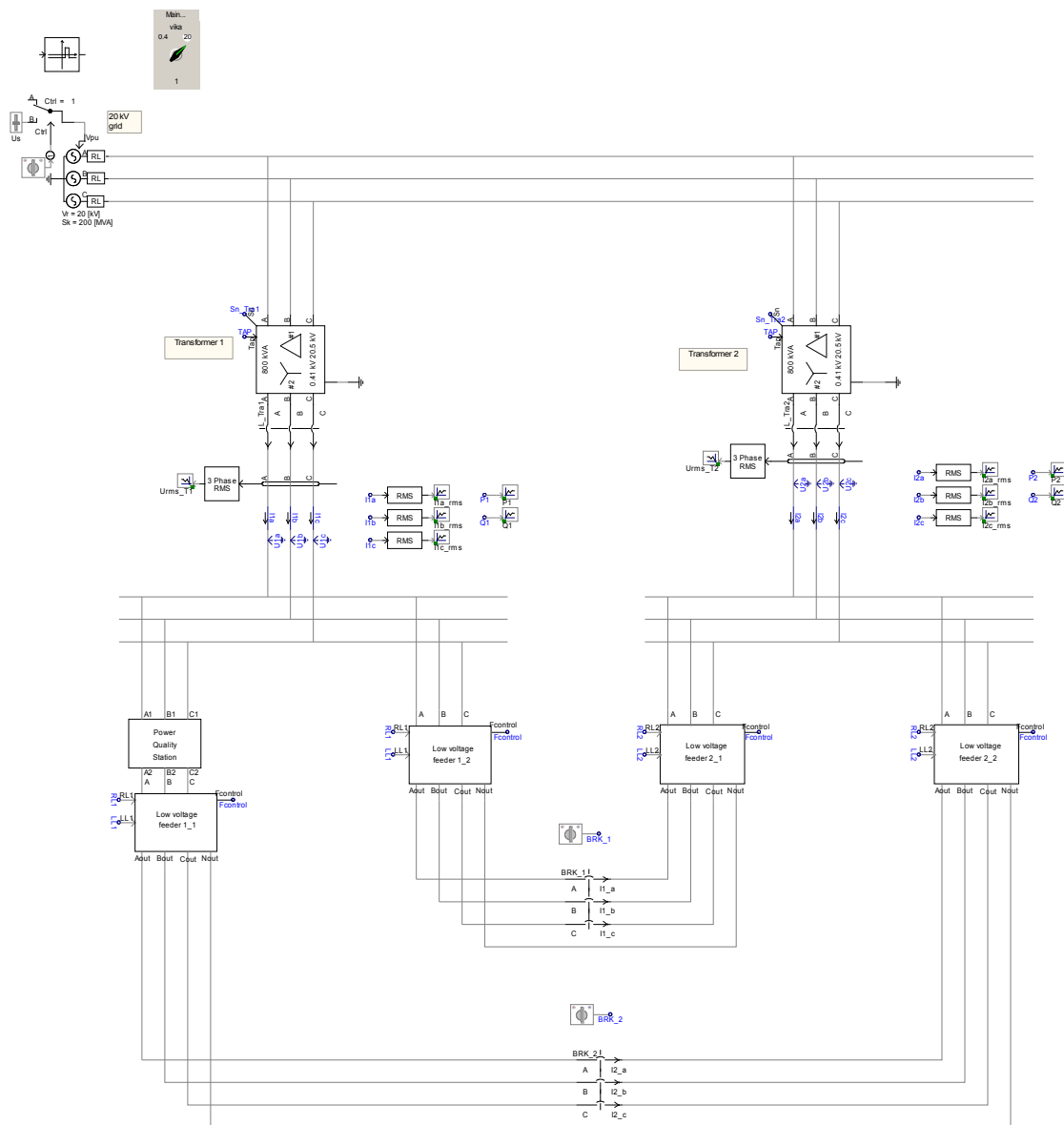


Kuva 12. Sähkölaatuaseman geneerinen energiaravaston Pscad-malli.

Verkkomalli

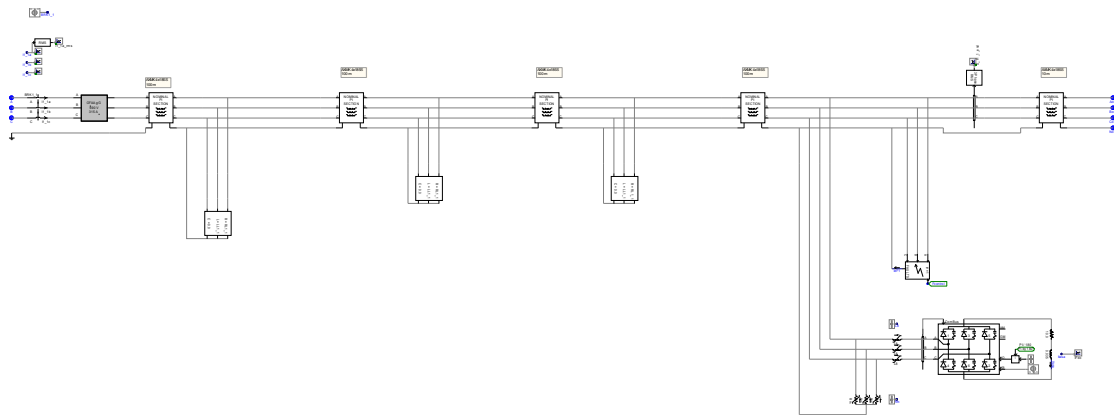
Sähkölaatuaseman malli kytketään osaksi Simulointiympäristö-hankkeessa kehitettyä pienjänniteverkkomallia. Alun perin simuloinnit suunniteltiin toteutettavaksi käyttäen sekä haja-asutusalueen AMKA-verkkoa että taajaman kaapeliverkkoa kuvaavia malleja. Osin aikataulusyistä johtuen simuloinnit toteutetaan vain käyttäen pienjännitekaapeli-verkon mallia. Oletettavasti AMKA-verkolla toteutettujen simulointien tulokset olisivat olleet myös hyvin samansuuntaisia.

Verkkomalli on esitetty kuvassa 13, jossa myös sähkölaatuasema on jo kytketty yhden lähdön alkuun.



Kuva 13. Verkkomalli, sähkölaatuasema äärimmäisenä vasemmalla olevan lähdön alussa.

Verkkomalliin sijoitettiin vaihtosuuntaaja laatuaseman syöttämälle lähdölle tuottamaan verkkoon yliaaltoja (ks. kuva 14).



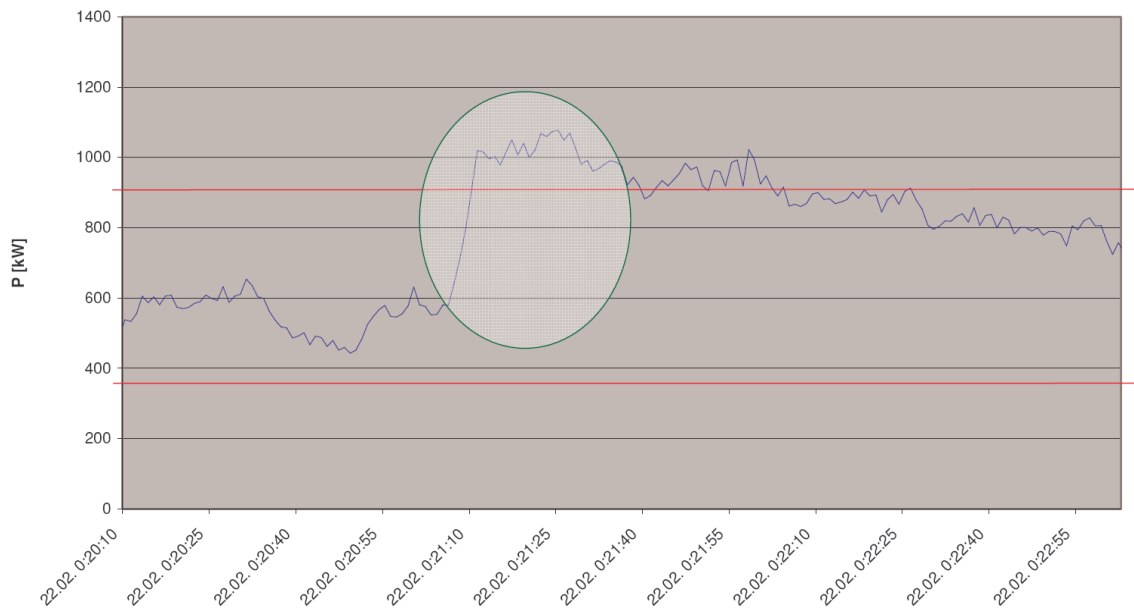
Kuva 14. Johtolähtö, jossa 3 passiivista kuormaa (vakioimpedanssi) ja yksi vaihtosuuntaajakuorma.

3 TUULIVOIMALA KESKIJÄNNITEVERKOSSA

Näissä simuloinneissa käytetään Pscad-ympäristön kannalta äärimmäisen pitkää simulointiaikaa eli 30 sekuntia, kun tavanomaisesti tällä transienttityökalulla tutkitaan lyhyen aikavälin, enintään muutaman sekunnin nopeita muutoksia. Varsinkin ohjattuja suuntaajia sisältävät mallit ovat laskennallisesti raskaita ja modernillekin tietokoneelle hitaita suorittaa. Simulaatioissa käytettiin laskenta-aika-askeleena 20 mikrosekuntia ja tulosten tallentamisaskeleena 100 mikrosekuntia. Tallennettavia kanavia oli sen verran useita, että tulostiedostot kasvoivat myös helposti kohtuuttoman suuriksi. Pscad ei suostunut simuloimaan, mikäli tallennettava tulostiedosto kasvoi yli 500 megatavun. Nämä seikat rajoittivat käytännössä ajettavien simulaatioiden pituuden tätä työkalua käytettäessä.

Jatkossa haluttaessa tutkia vastaavia pitkän aikavälin tehollisarvovaihteluita kannattaisi ehkä käyttää erityisesti tehollisarvolaskentaan perustuvia työkaluja tai toteuttaa Pscad-ajo niin, että tuloksista tallennettaisiin vain tehollisarvot pidemmällä aika-askeleella. Nopeammat muutokset sekä hetkellisarvot ja käyrämuodot selviävät periaatteessa Pscad:llä lyhyilläkin ajoilla.

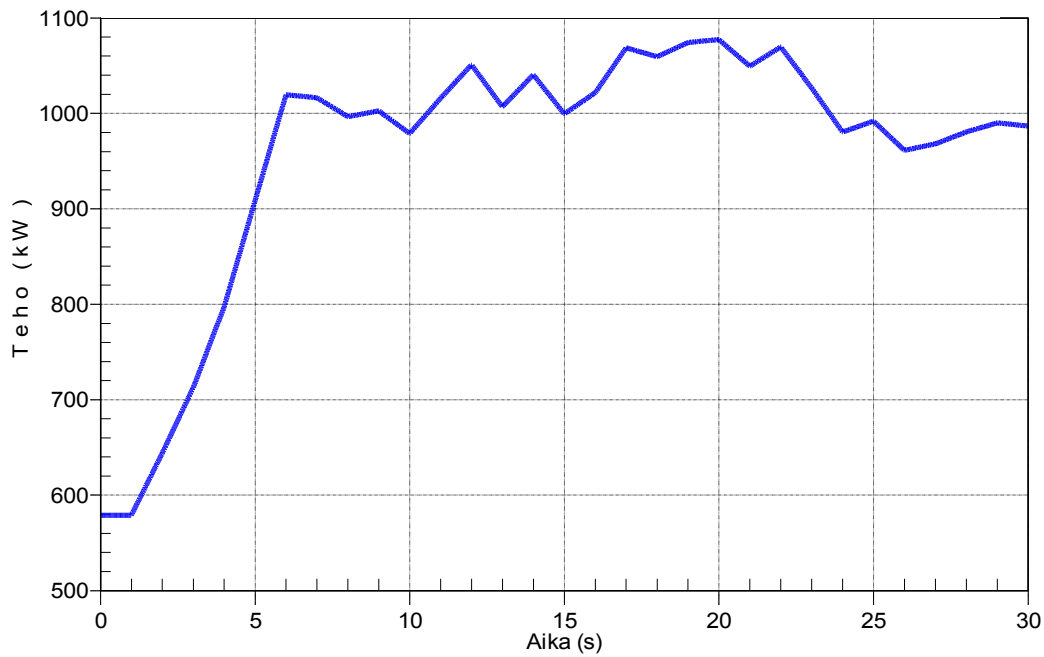
Tuulivoimalasta mitattua tehotietoa oli käytettävissä n. 18 tunnin ajanjaksolta. Mittaukset oli tallennettu 1 sekunnin välein. Nopeiden muutosten simuloinneissa olisi ollut toivottavaa saada käyttöön ainakin 10-kertaisella tallennustaajuudella lyhyen ajanjakson mittaustuloksia, jotta todellinen tehon muutosnopeus saataisiin selville. Kuvassa 15 on esitetty vain osa tästä käytettävissä olleesta mittaustiedosta sekä rajattu 30 sekunnin alue, jota käytettiin simuloinneissa. Tässä samassa osuudessa on sekä nopea tehon muutos että asetetun maksimitehon ylitys.



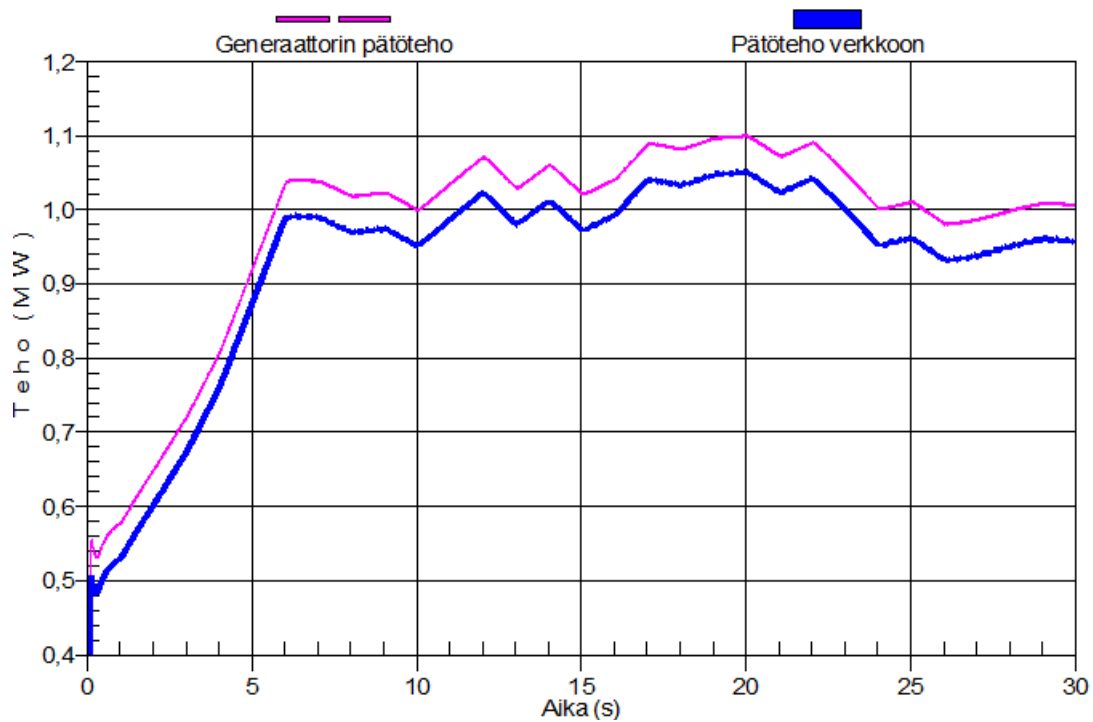
Kuva 15. Lyhyt osuus käytettävissä olleesta erästä todellisesta tuulivoimalasta vuodelta 2001 mitatusta tehotiedosta. (VTT:n toimittama Excel-tiedosto ”ENVATUULI”) Simulaatiossa käytetty osuus on merkitty kuvaan soikiolla.

3.1 Tuulivoimalan epätahtigeneraattorin suora verkkoonliityntä.

Käytetyssä simulointimallissa tuulivoimalan roottorin vääntömomenttia ei ole mallinnettu yksityiskohtaisesti lähtien tuulen nopeudesta, vaan sen sijasta käytetään suoraan tiedostosta luettua mitattua tehotietoa. Tehoarvosta lasketaan generaattorille sopiva momenttiohje siten, että generaattorin häviöt katetaan myös annettavalla ohjeella ja generaattorista saatava pätöteho vastaa likimain mittaustiedostossa olevaa arvoa. Tuulivoimalan omakäyttökuormaa simuloiva 100 kVA:n yliaaltopitoinen kuorma vastaavasti verottaa häviöiden lisäksi verkkoon syötettävää pätötehoa verrattaessa keskenään käyriä kuvassa 17. Vertaamalla keskenään kuvia 16 ja 17 voidaan todeta pieni ero mittaustiedostossa olleen ohjeen ja simulaatituloksen välillä.



Kuva 16. Todellisen tuulivoimalan mitatuista tehotiedosta simuloinnissa käytetty osuus.

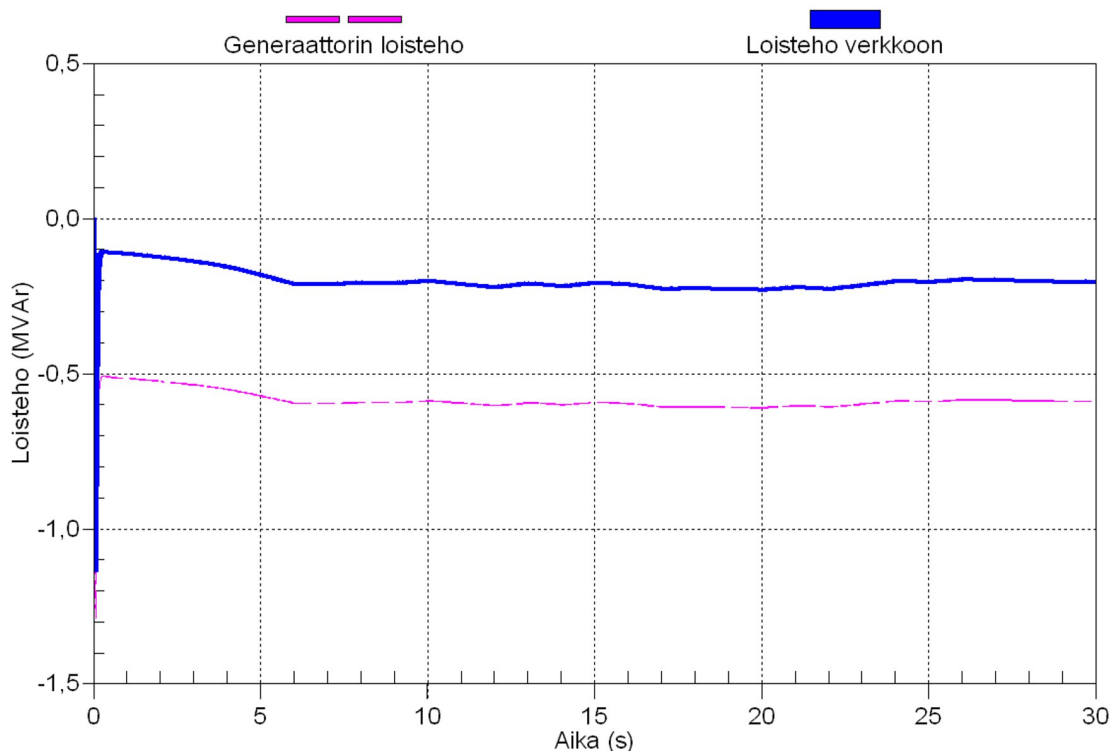


Kuva 17. Generaattorin syöttämä sekä verkkoon syötetty pätöteho.

Tämä ero johtuu osin siitä, että häviöiden kompensointiin käytetty vakiokerroin on viritetty lähinnä kyseisen 1,65 MW koneen nimellisteholle. Toisaalta simuloinnissa

käytetystä suurehkoista omakäyttökuormasta (100 kVA) johtuen verkkoon syötetty teho jää kuitenkin mittaustuloksia pienemmäksi. Omakäyttökuorman teho on jonkin verran yläkanttiin asetettu, mutta antaa hyvän kuvan yliaaltojen verkkovaikutuksista.

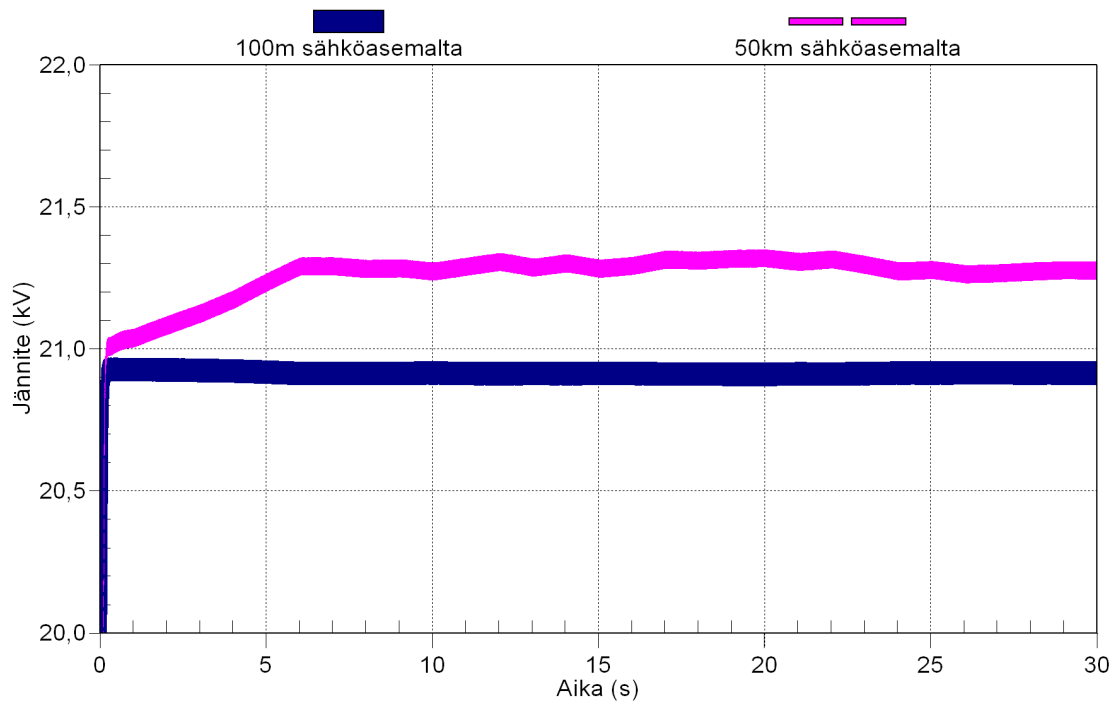
Generaattori tarvitsee toimiakseen verkosta loistehoa. Generaattorin 690 voltin jänniteportaassa on rinnankytketty automaattisesti säätävä loistehon kompensointikondensaattoriparisto, jolla saadaan merkittävästi vähennettyä verkosta tarvittavaa loistehoa. Tämä selviää vertaamalla käyriä kuvassa 18.



Kuva 18. Generaattorin syöttämä sekä verkkoon syötetty loisteho.

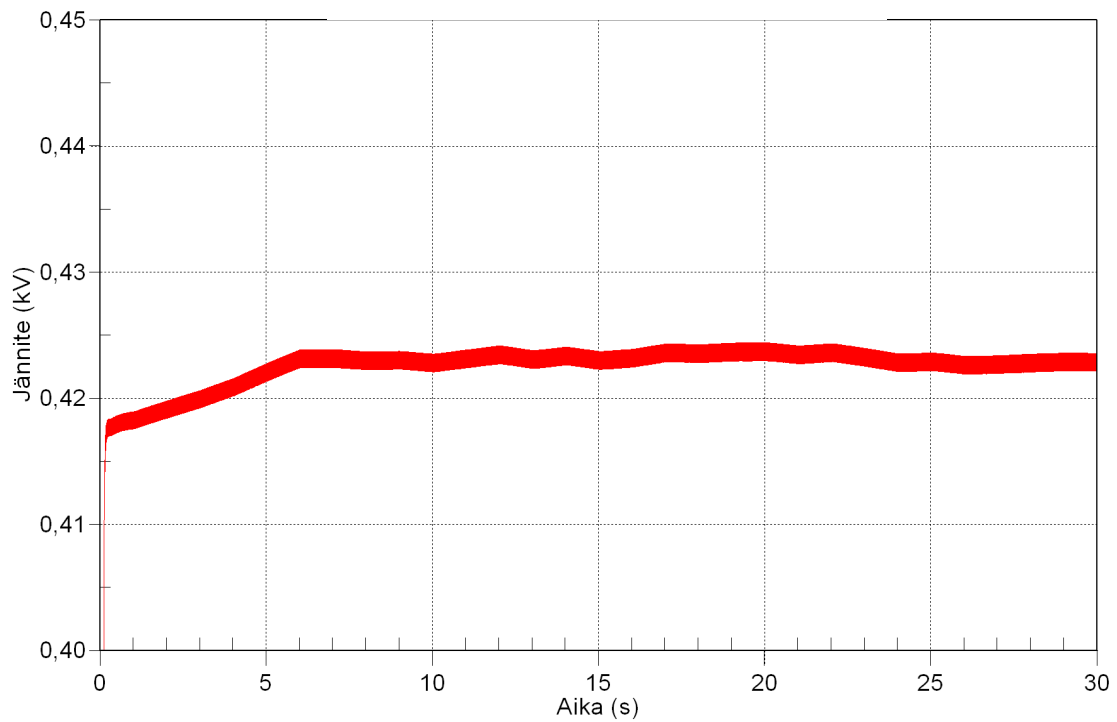
Näissä simuloinneissa omakäyttökuorma pysyy vakiona, mitä se ei todellisuudessa ole. Samoin simuloinneissa verkossa esiintyvä kuormitus pysyi vakiona, jolloin tuulivoimalan vaikutukset ainoana muuttuvana (negatiivisena) kuormituksena ovat suoraan luettavissa mittaustuloksista.

Pitkän ja heikon keskijännitelähdön päähän asennetun tuulivoimalan vaikutus linjan loppupään jännitteeseen suuria tehoja verkkoon syötettäessä on nähtävissä selvästi kuvassa 19.



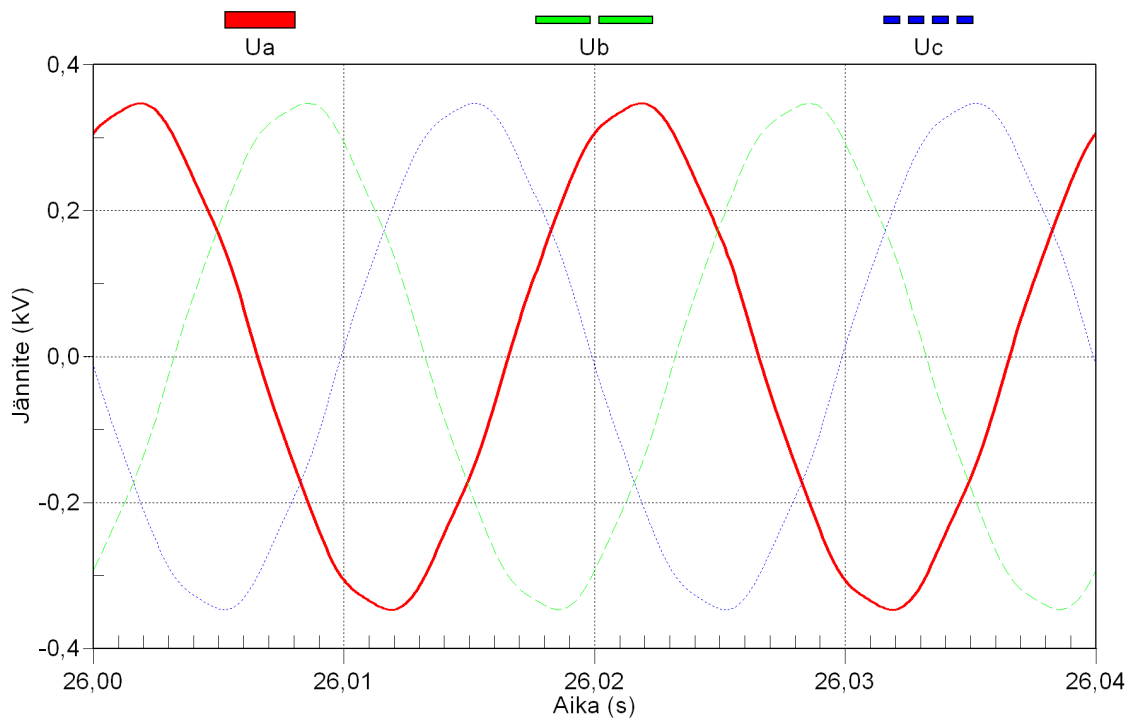
Kuva 19. Tuulivoimalan aiheuttama jännitteen vaihtelu keskijänniteverkossa lähdön 1 kummassakin päässä.

Tuulivoimalan sisältämä lähtö oli pituudeltaan 50 km. Lähdön 1 päästä mitattu keskijännitteen tehollisarvo on siis samalla tuulivoimalan liityntäpisteen jännitetason vaihtelua kuvaava suure. Simuloinnissa tuulivoimalaa lähinnä oleva jakelumuuntaja on kytketty suoraan tähän samaan liityntäpisteeseen. Jännitteen vaihtelu muuntajan pienjännitepuolella on nähtävissä kuvassa 20.



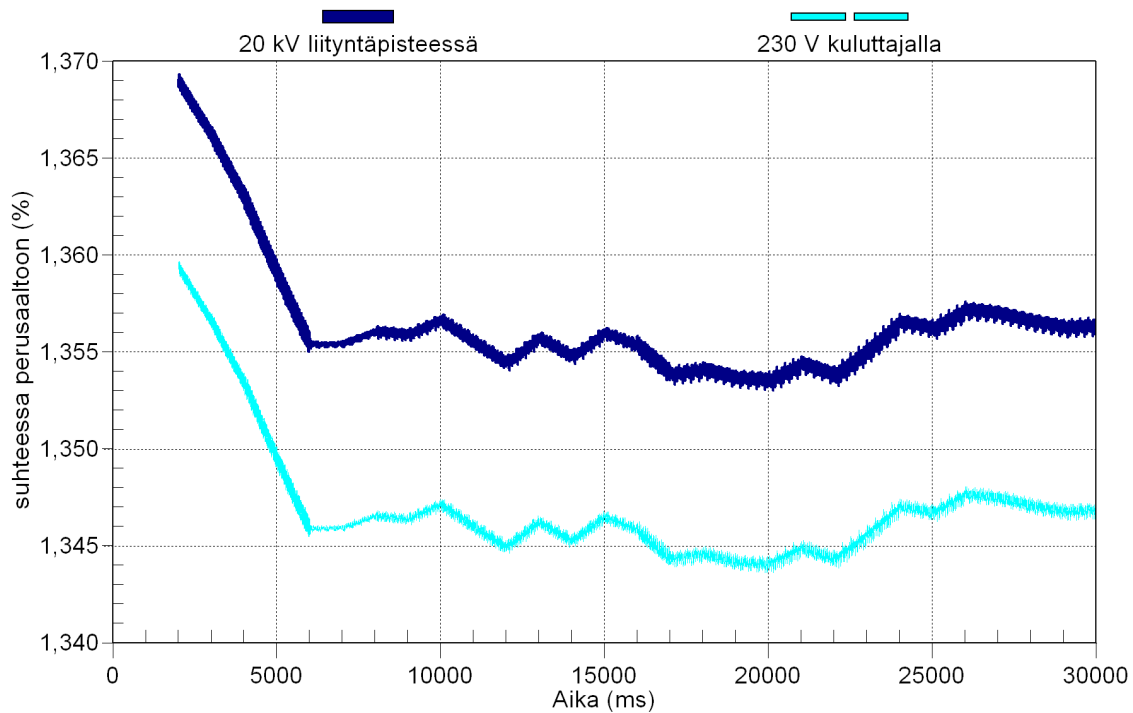
Kuva 20. Tuulivoimalan aiheuttama pääjännitteen vaihtelu lähimmällä kuluttajalla.

Kuluttajan jännitteen käyrämuoto tuulivoimalan ollessa suoraan verkkoon kytkettynä on nähtävissä kuvassa 21. Tarkempi yliaaltoanalyysi on nähtävissä seuraavilla sivuilla.



Kuva 21. Lähimmän kuluttajan vaihejännitteen käyrämuoto ja hetkellisarvon huippuarvo tuulivoimalan ollessa suoraan verkkoon kytkettynä.

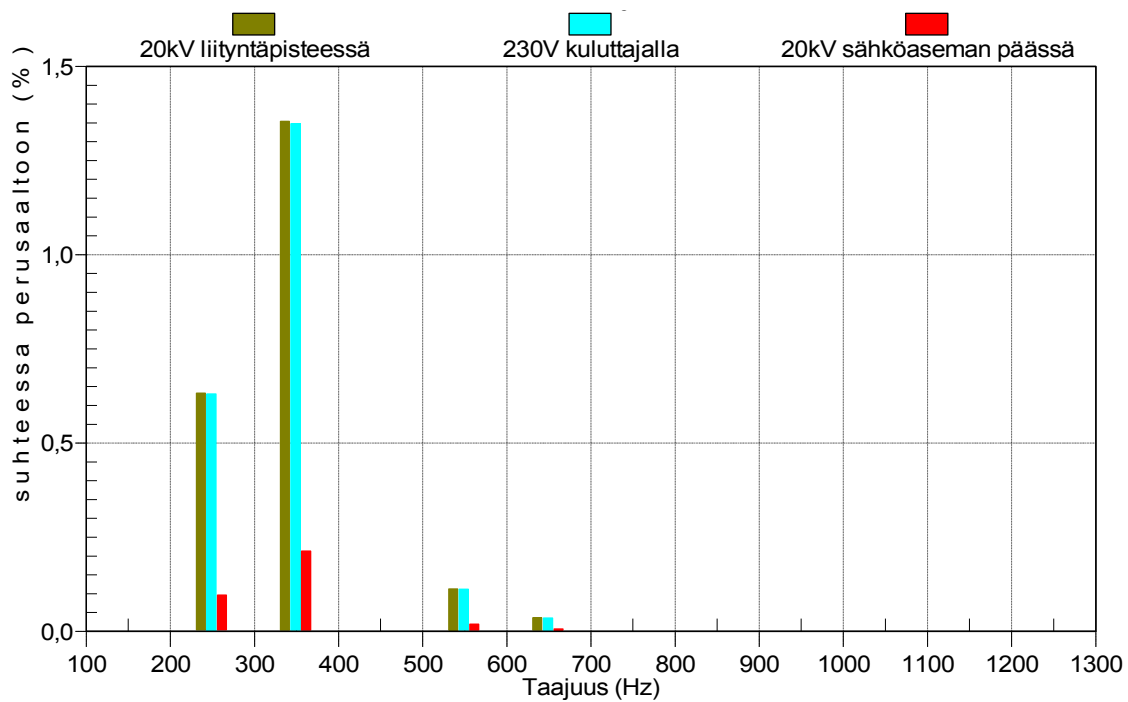
Kuvassa 22 näkyvä yliaaltojen suhteellisten osuuksien ajallinen vaihtelu johtuu pääasiassa siitä, että yliaaltopitoinen kuorma tuulivoimalan 690 voltin jänniteportaassa pysyy vakiona tuotetun tehon vaihdellessa. Tämä ilmenee verrattaessa tuotetun tehon käyrää kuvassa 17 esitettyyn yliaaltojen ajalliseen vaihteluun, jolloin huomataan kuvan 22 käyrien olevan käänteisiä tehon vaihteluun nähden.



Kuva 22. Suhteellisen yliaaltopitoisuuden vaihtelu eri ajankohtina tuotetun tehon vaihdellussa. Kuvassa on 7. yliaallon osuus tuulivoimalaa lähimmän jakelumuuntajan molemmilla puolilla.

Kuvan 23 jännitteen spektri on laskettu kohdasta, jossa on alkurampin jälkeen suurin suhteellinen yliaaltopitoisuus, eli 26 sekunnin kohdalla. Spektrissä on nähtävissä pääasiassa tuulivoimalan omakäyttökuormaa simuloivan yliaaltopitoisen kuorman asetuksiin syötetyt yliaaltotaajuudet. Tosin 3. yliaallon osuus on kumoutunut pois näkyvistä ja 5. sekä 7. yliaallon pitoisuudet ovat huomattavasti suuremmat kuin kuormitukseen asetetut arvot. Näiden taajuuskomponenttien merkittävä lisäys on peräisin tuulivoimalan epätahtigeneraattorin ja loistehon kompensointiin käytettyjen kondensaattoreiden sekä verkon impedanssien yhteisvaikutuksista.

Yliaaltospektrit on laskettu FFT-menetelmällä simulaatiossa eri paikoista mitatuista vaihejännitteistä.



Kuva 23. Jännitteen yliaaltopitoisuus eri kohdissa verkkoa simuloinnin hetkellä $t = 26$ s.

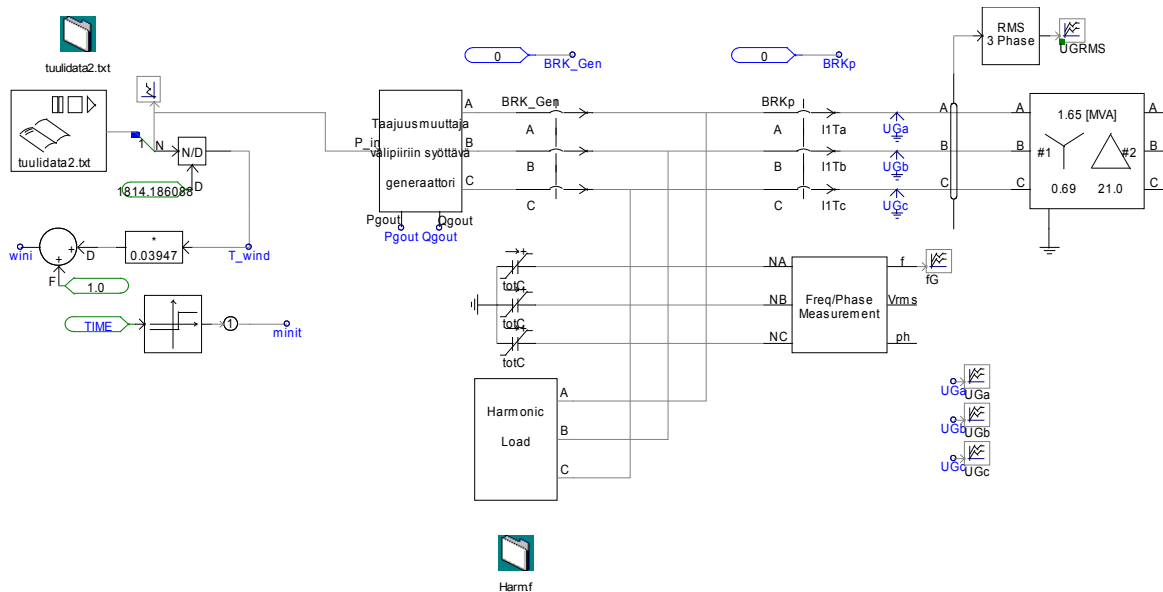
Taulukossa 1 on esitetty spektrin (FFT) tulokset numeerisesti sekä harmonisen kokonaissärön suhde perusaaltoon (THD). Nämä tulokset ovat samalta ajan hetkeltä kuin spektrin graafinen muoto kuvassa 23.

Taulukko 1. Jännitteen yliaaltopitoisuudet sekä THD simulointihetkellä $t = 26$ s. Sähköasemalla (SA), liittytäpisteessä (LP) ja kuluttajalla (KU)

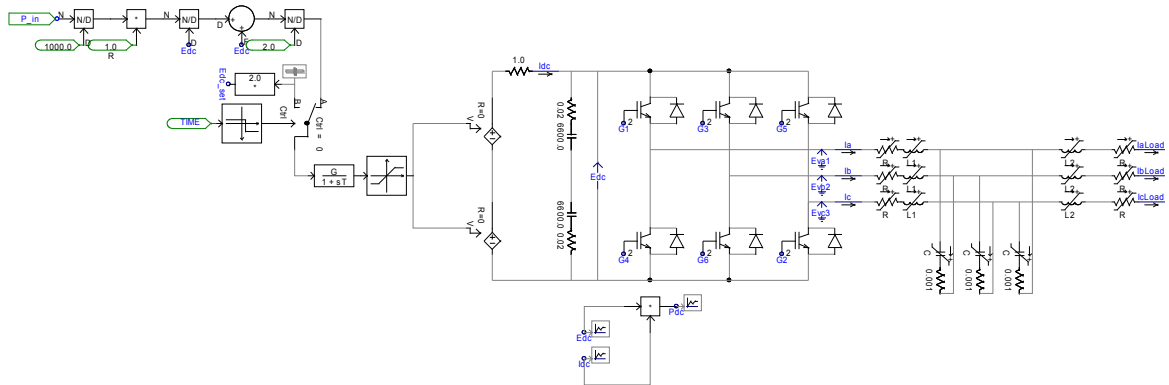
Pisteen nimi	Perusaalto kV	THD %	Harmoniset yliaallot					
			%H3	%H5	%H7	%H9	%H11	%H13
20 kV SA	12,069	0,2351	0,0003	0,0964	0,2131	0,0003	0,0195	0,0067
20 kV LP	12,280	1,4992	0,0002	0,6329	1,3539	0,0003	0,1129	0,0361
400 V KU	0,24	1,4927	0,0020	0,6304	1,3478	0,0002	0,1121	0,04

3.2 Taajuusmuuttaja tuulivoimalan verkkoon kytkennässä

Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytkettyyn epätahtigeneraattoriin perustuvalle tuulivoimalalle ei ollut saatavilla valmista Pscad:lle tehtyä mallia ja sen toteuttaminen suhteellisen monimutkaisine säätäjiineen olisi vaatinut parin kuukauden työpanoksen, joten näin tarkkaa mallia ei tämän tutkimuksen puitteissa ollut mahdollista tehdä. Tätä tuulivoimalaratkaisua kuvaava malli toteutettiin yksinkertaistetulla sijaiskytkennällä, joka verkkovaikutusten kannalta vastannee varsin hyvin todellista tilannetta. Sijaiskytkennässä verkkovaihtosuuntaaja mallinnettiin komponenttikohtaisella IGBT-vaihtosuuntaajamallilla, mutta epätahtigeneraattori ja siihen kytkeytyvä suuntaaja oli korvattu ohjatulla jännitelähteellä, joka syötti jännitevälipiiriin generaattorin tuottamaa tehoa vastaavan tehon. Kuvassa 24 on esitetty taajuusmuuttajan sijainti verkossa sekä teho-ohjeen syöttö. Kuva 25 esittää taajuusmuuttajan kytkennän sekä jännitevälipiiriin tehoa syöttävän jännitelähteen ohjauksen laskennan.

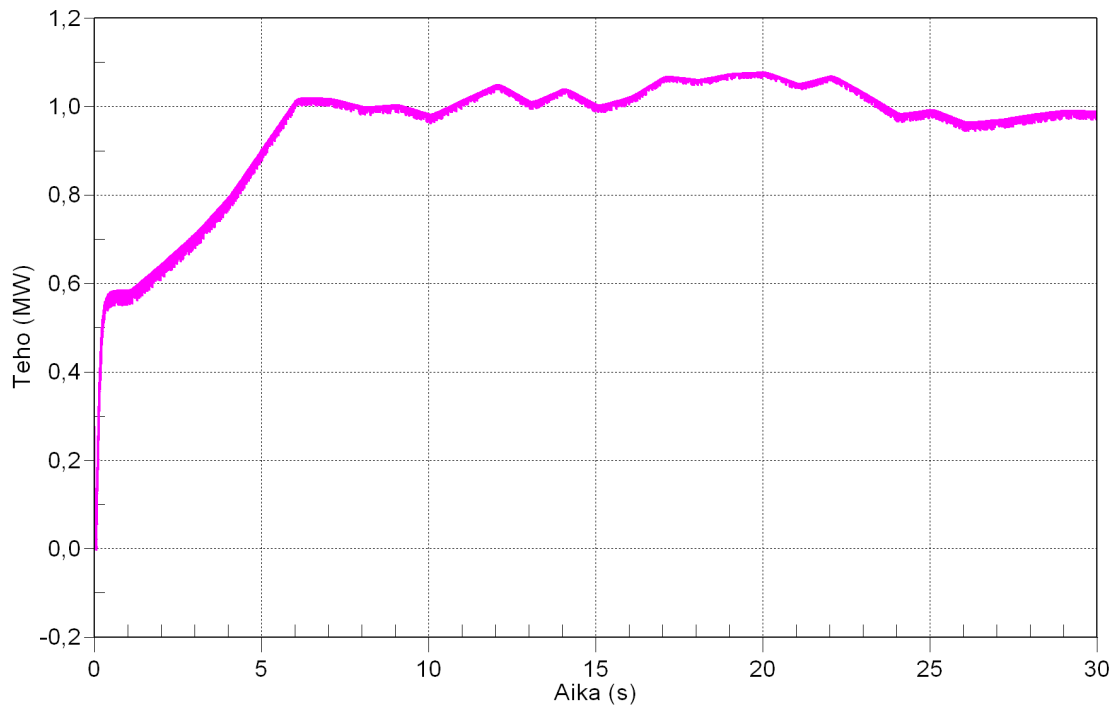


Kuva 24. Taajuusmuuttaja tuulivoimalan simulointimallissa.



Kuva 25. Taajuusmuuttajan kytkentä ja tehon syöttö ohjatulla jännitelähteellä.

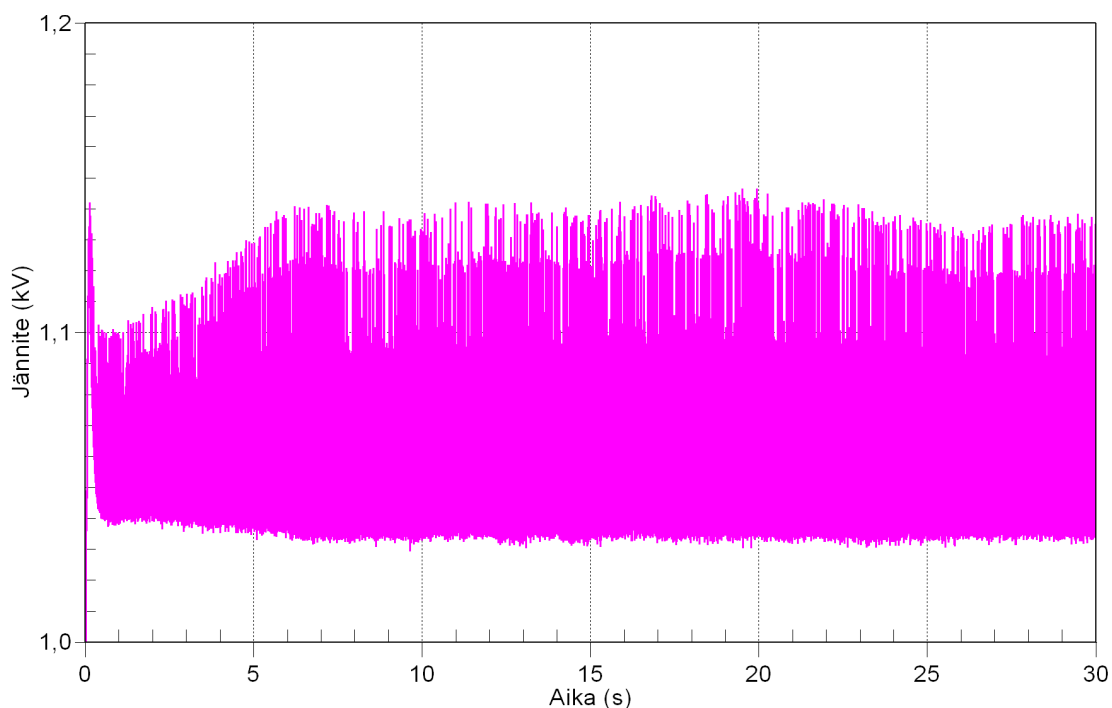
Jännitevälipiiriin syötetty teho laskettiin mittaamalla välipiirin jännite sekä siihen syötetty virta. Kuva 26 esittää näin saadun tehon käyrämuodon.



Kuva 26. Ohjeen mukaisen syötetyn tehon tarkistuslaskenta, kun tuulivoimalan teho syötetty taajuusmuuttajan välityksellä.

Taajuusmuuttajan verkkovaihtosuuntaajan ohjaustavaksi valittiin jännitevälipiirin jännitetason mukainen tehon säätö. Tässä simulaatiossa käytetään kytkimien ohjausmenetelmänä yksinkertaista hystereesisäätöä, koska myöhemmin simuloitavassa sähkönlaatuaseman mallissa käytetään samaa ohjausmenetelmää.

Välipiirin jännitereferenssiksi valittiin 1050 V, jonka ylittyessä vaihtosuuntaaja alkaa syöttää tehoa verkkoon päin. Verkosta välipiiriin päin ei tehoa ohjata varsinaisilla ohjatuilla kytkimillä, vaan simulaation alussa välipiiri latautuu kytkimien rinnalla olevien diodien kautta 690 V verkkojännitettä vastaavaan tasasuuntausjännitteeseen asti. Lisäksi ohjatun tehoa syöttävän jännitelähteen alkuarvoksi asetettiin välipiirin jännitereferenssin suuruus 1050 V 50 ms ajaksi, jolloin jatkuva tila saavutettiin simuloinnissa nopeammin. Kuva 27 esittää välipiirin jännitteen käyttäytymistä simulaation aikana.



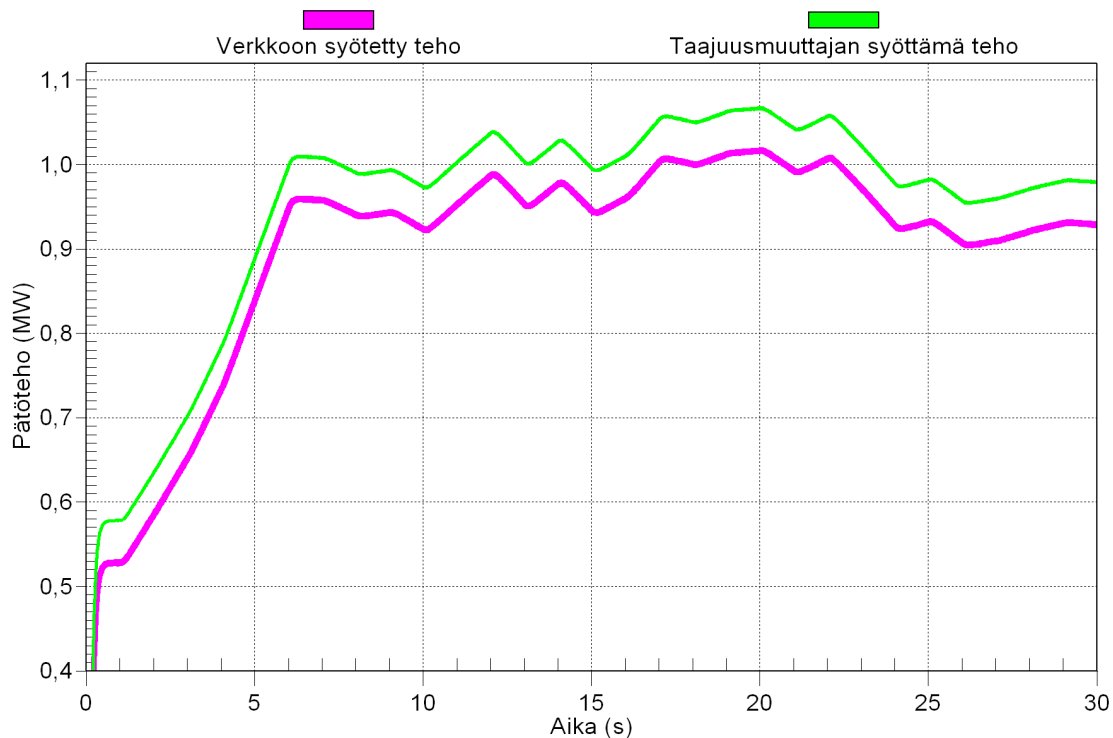
Kuva 27. Taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen vaihtelu simuloinnin aikana, kun tuulivoimala on taajuusmuuttajalla kytketty verkkoon.

Kun simulaatiossa käytetty tehoa syöttävä ohjattu jännitelähde pyrkii pitämään syötetyn tehon asetetussa – lyhyellä aikavälillä lähes vakiossa – arvossa ja vaihtosuuntaajan verkkoon syöttämä teho vaihtelee, pyrkii välipiirin jännite heilahtelemaan. Tämä saa taas puolestaan verkkoon syötetyn tehon heilahtelemaan, joten säätäjien aikavakioiden hienosäätö on melkoisen tarkkaa. Tässä simulaatiossa verkkovaihtosuuntaajan virtaohjetta säädetään välipiirin jännitteen mukaan. Jännitesäätäjän aikavakioksi

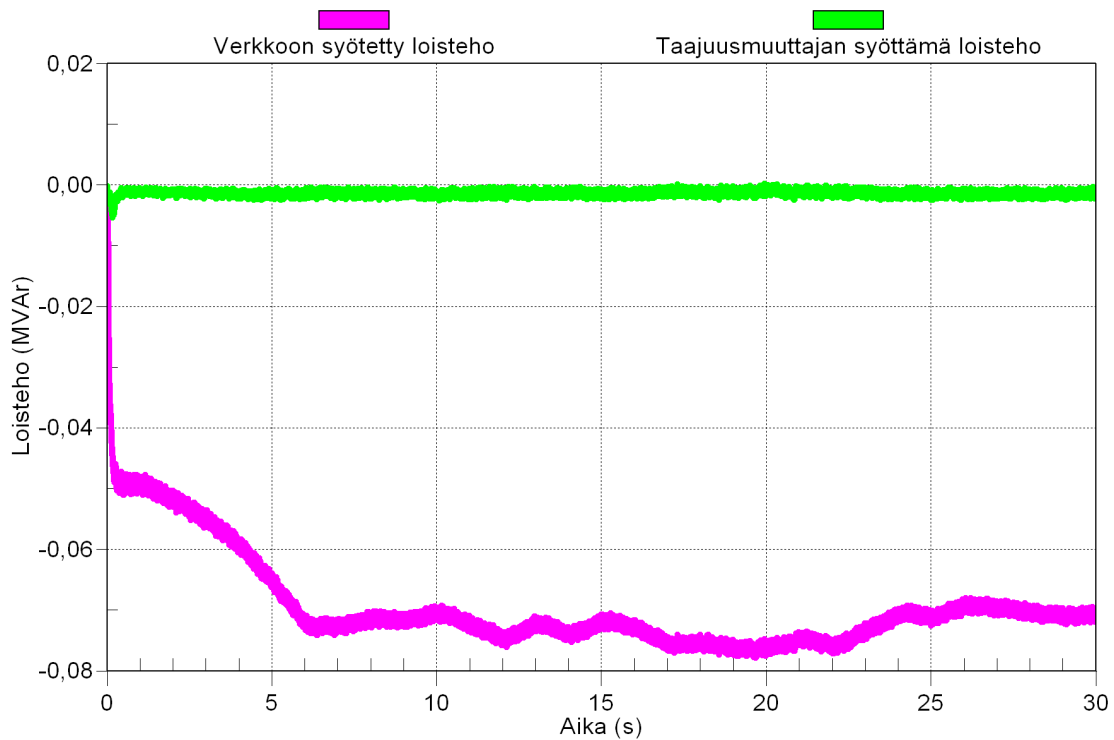
valitaan yhden jakson aika eli 20 ms syötettävän tehon jaksonaikaisen vaihtelun vähentämiseksi.

Todellisessa taajuusmuuttajassa välipiirin jännite myös vaihtelee rajallisen kapasitanssin vaikutuksesta, joten tässä kohdin simulointitulosta voidaan pitää kuitenkin kohtalaisen hyvin todellisuutta vastaavana.

Taajuusmuuttajan syöttämä pätö- ja loisteho on nähtävissä kuvissa 28 ja 29. Koska taajuusmuuttajan ohjauksessa voidaan säätää tarkasti haluttu virran vaihekulma tai pätö- ja loiskomponentit, saadaan taajuusmuuttajasta syötettyä puhdasta pätötehoa. Koska taajuusmuuttajan jälkeen 690 V jänniteportaassa on induktiivinen kuormitus, on kuitenkin verkkoon syötetty loisteho nollasta poikkeava. Tähän asiaan saadaan muutosta alaluvussa 3.4, missä pyritään kompensoimaan taajuusmuuttajalla verkkoon syötetty loisteho nolllaksi.

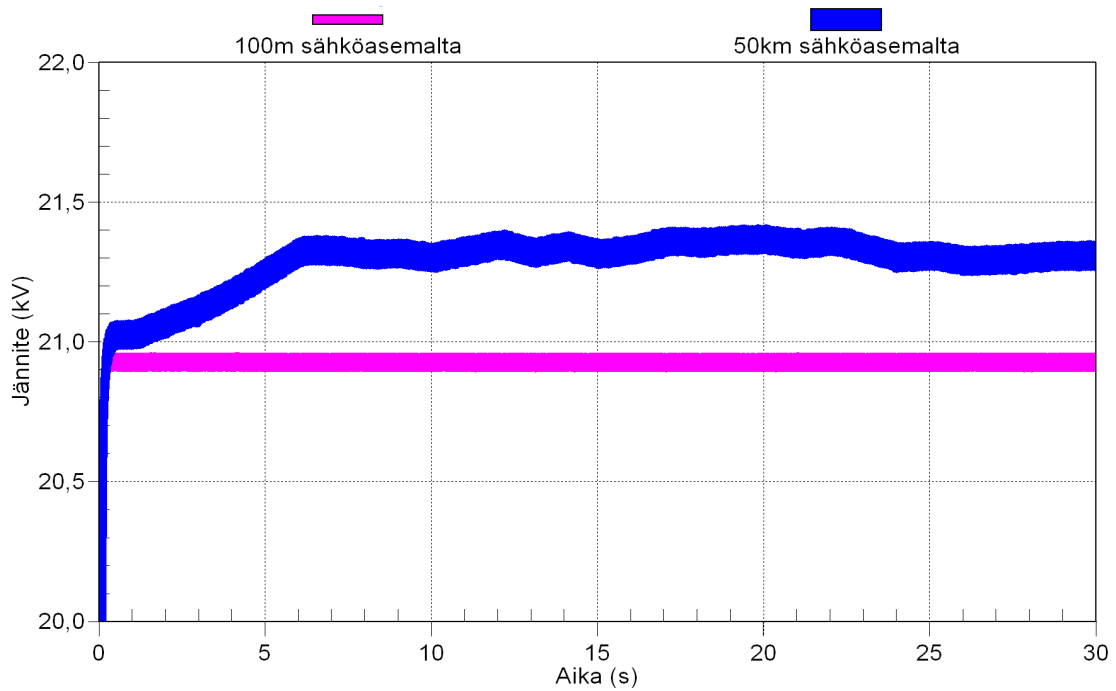


Kuva 28. Taajuusmuuttajan syöttämä ja verkkoon syötetty pätöteho.

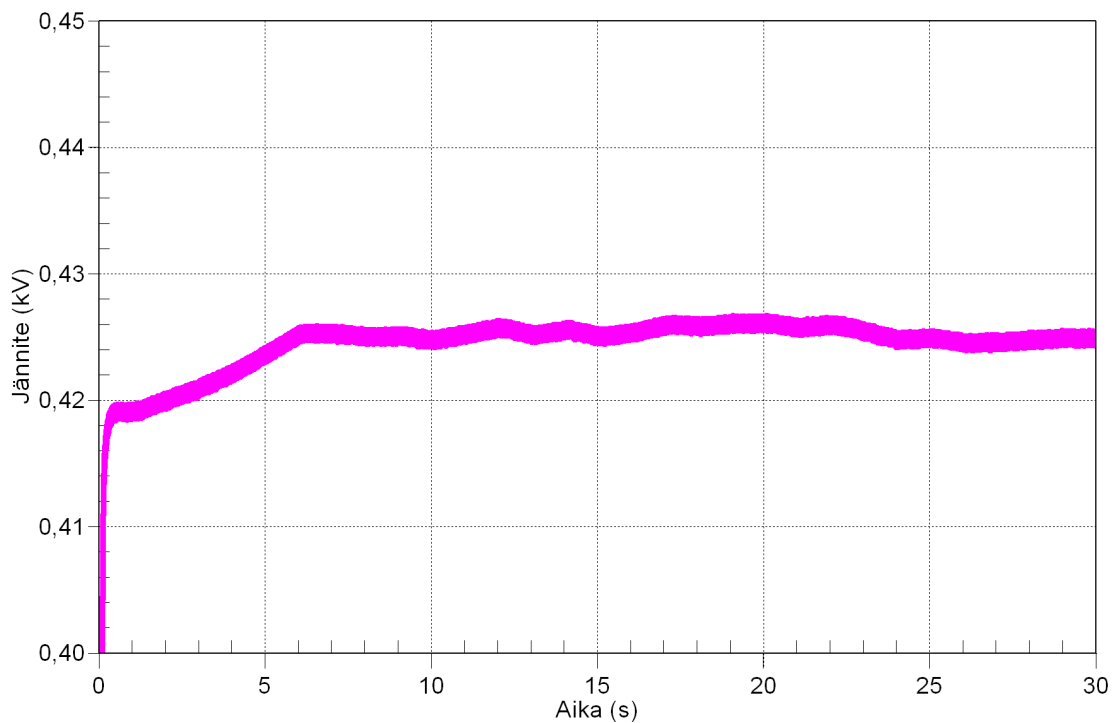


Kuva 29. Taajuusmuuttajan syöttämä ja verkkoon syötetty loisteho.

Taajuusmuuttajan välityksellä verkkoon syötetty teho aiheuttaa samanlaisen jännitteen nousun verkossa kuin suoraan verkkoon kytketty generaattori. Tämä selviää verrattaessa keskenään kuvia 19 ja 30. Loistehon tarpeen väheneminen näkyy sähköaseman puoleisen jännitteen tasaisuutena kuvassa 30 verrattaessa suoraan verkkoon kytketyn generaattorin tapaukseen, jossa lähdön alkupään jännite notkahti hieman syötettäessä suurempia tehoja verkkoon. Kuluttajan jännitteen käyttäytymistä voidaan verrata katsottaessa kuvia 20 ja 31 ja havaita erojen olevan yhtä pieniä kuin keskijännitteelläkin.

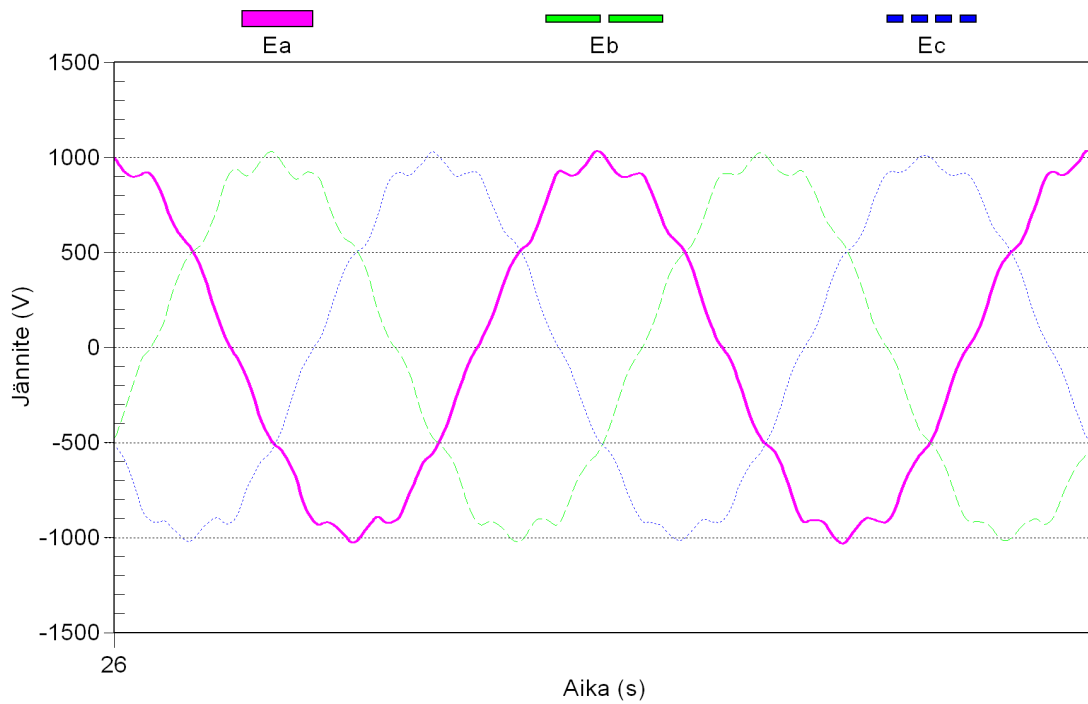


Kuva 30. Keskijännitteen tehollisarvon vaihtelu lähdön 1 molemmissa päissä, kun tuulivoimala on taajuusmuuttajalla kytketty verkkoon.

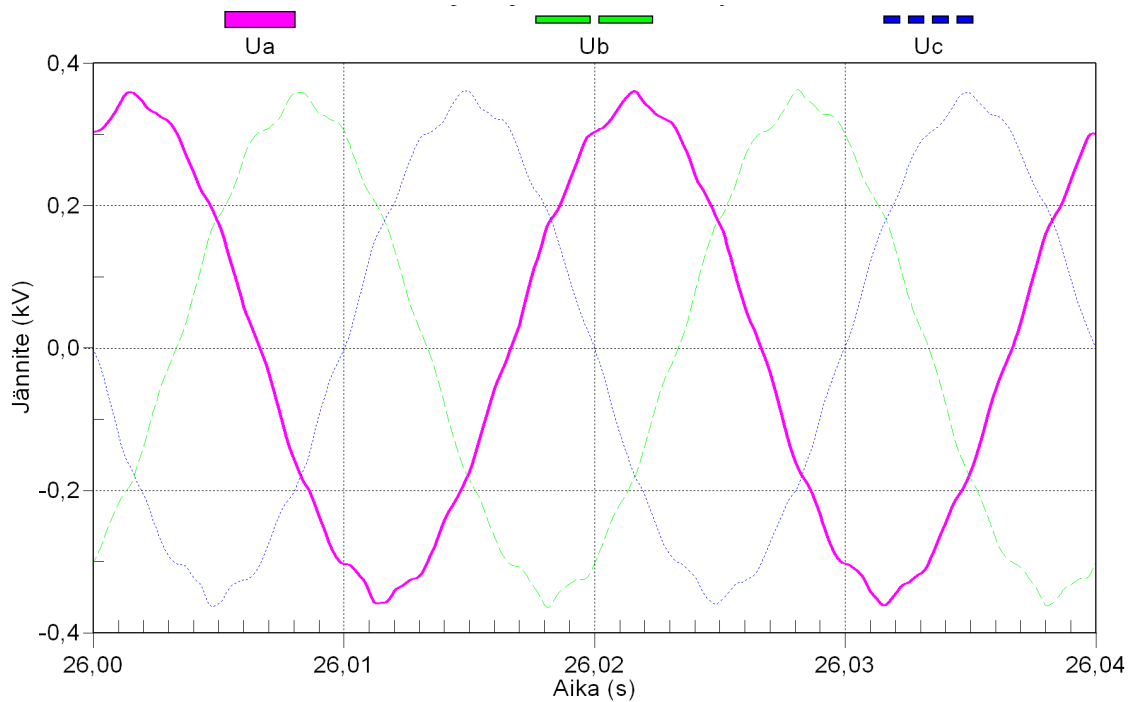


Kuva 31. Lähimmän kuluttajan pääjännitteen tehollisarvon vaihtelu, kun tuulivoimala on taajuusmuuttajalla kytketty verkkoon.

Taajuusmuuttajan ohjaustavasta ja käytetyistä suodattimien parametreista johtuen vaihtosuuntaajan ulostulon jännitteen käyrämuoto poikkeaa melkoisesti ulkonäöltään puhtaasta sini-aallosta, mikä näkyy selvästi kuvassa 32. Mallia tarkentamalla halutun todellisen järjestelmän parametrien mukaiseksi saadaan kyseisen järjestelmän vaikutukset verkossa selville. Tässä esitetyn mallin mukainen jännitteen säröytyminen näkyy kuluttajan jännitteen käyrämuodossa kuvan 33 osoittamalla tavalla.

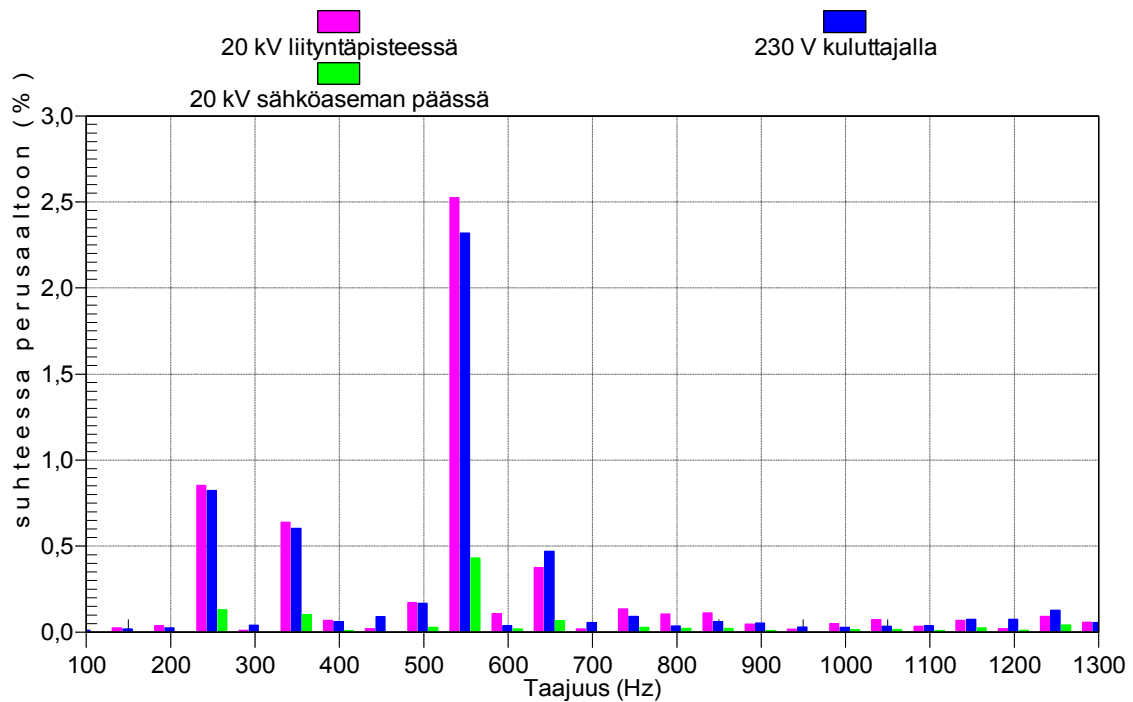


Kuva 32. Taajuusmuuttajan ulostulon jännitteen käyrämuoto.



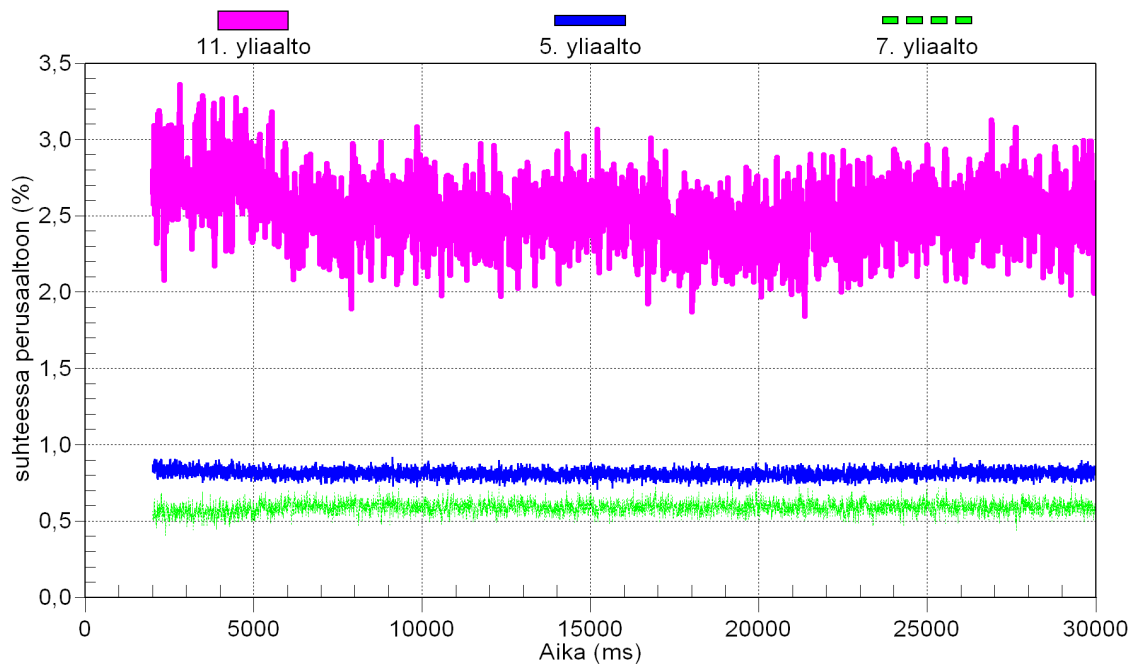
Kuva 33. Kuluttajan vaihejännitteen käyrämuoto, kun tuulivoimala on taajuusmuuttajalla kytketty verkkoon.

Runsas yliaaltopitoisuudet ovat selvästi havaittavissa ihan silmämääräisesti jännitteiden käyrämuodoissa, mutta tarkemmin asiasta saa selvää laskennallisen Fourier-analyysin perusteella. Kuvassa 34 on esitetty vaihejännitteen spektri tuulivoimalan liityntäpisteessä 20 kV:n puolella lähdön 1 loppupäässä sekä alkupäässä ja liityntäpisteessä olevan kuluttajan 400 V puolelta. Spektri on laskettu vastaavasta kohdasta tuulen tehokäyrää kuin edellisessä tapauksessa, jossa tuulivoimala oli kytketty suoraan verkkoon. Suurimpana jännitteen harmonisena komponenttina esiintyy 550 Hz eli 11. harmoninen.



Kuva 34. Vaihejännitteen spektri eri kohdista verkkoa laskettuna ajanhetkellä $t = 26$ s, kun tuulivoimala on taajuusmuuttajalla kytketty verkkoon.

Yliaaltojen suhteellisen osuuden vaihtelevuutta simulaation kuluessa on tutkittu kuvassa 35. Vaihtelevuus tehon funktiona on samaa suuruusluokkaa kuin satunnaisen näköinen suodatuksista ja säätöperiaatteista johtuva värähtely. Vertailun vuoksi spektrit on laskettu jokaisessa tutkitussa tapauksessa samasta kohdasta tuulivoimalan tehokäyrää.



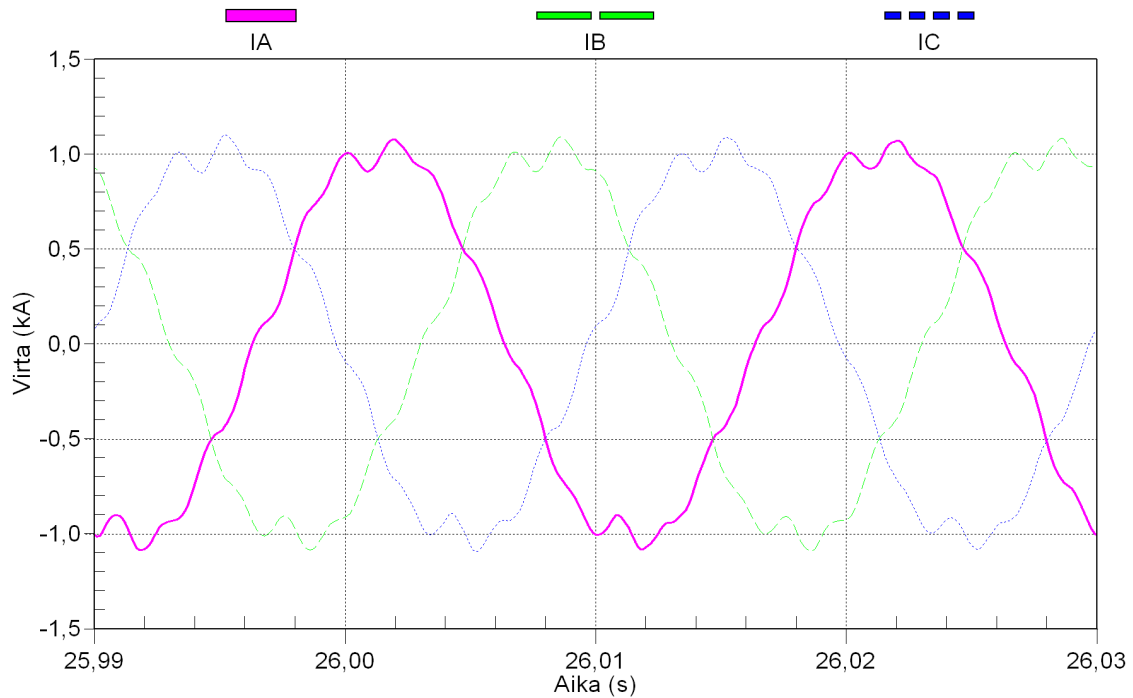
Kuva 35. Vaihejännitteen suhteellisten yliaaltopitoisuuksien vaihtelu tuulivoimalan liityntäpisteessä 20 kV jännitetasossa.

Koska suhteellisissa yliaaltopitoisuuksissa on kohtalaisen suuri heilunta ja jakelumuuntajan yliaaltoja vaimentava vaikutus nähtiin jo aiemmin kuvassa 22, ei ole tarpeen tässä kohdassa tarkastella vastaavaa käyrää muuntajan eri puolilta. Sen sijaan taulukossa 2 on esitetty spektrin harmoniset komponentit numeerisina keskijännitteen ja kuluttajan pienjännitteen lisäksi myös tuulivoimalan 690 V:n jänniteportaassa, eli taajuusmuuttajan ulostulossa. Taulukko näyttää myös jännitteen kokonaissärön näissä eri kohteissa.

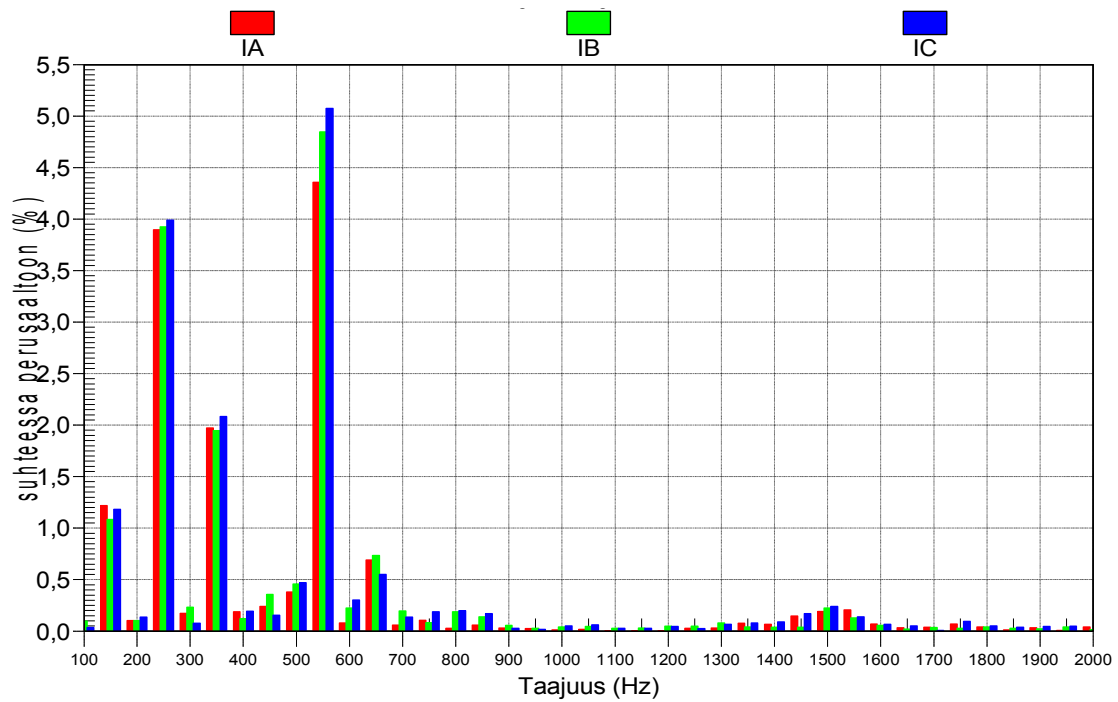
Taulukko 2. Yliaaltopitoisuudet eri kohdissa verkkoa sekä jännitteen harmoninen kokonaissärö (THD) suhteessa perusaaltoon. Sähköasemalla (SA), liityntäpisteessä (LP), kuluttajalla (KU), taajuusmuuttajan ulostulossa (G)

Pisteen nimi	Perusaalto kV	THD %	Harmoniset yliaallot					
			%H3	%H5	%H7	%H9	%H11	%H13
20kV LP	12,306	2,810	0,025	0,853	0,639	0,020	2,523	0,376
20kV SA	12,080	0,547	0,004	0,130	0,101	0,003	0,432	0,068
400V KU	0,25	2,614	0,018	0,823	0,602	0,090	2,318	0,470
690V G	0,405	4,327	0,138	1,440	1,042	0,152	3,829	0,749

Jotta jäljempänä voidaan havainnollistaa sähkönlaatuaseman toiminnallisuutta, on tässä pelkän taajuusmuuttajan yhteydessä tarkasteltu myös verkkoon syötettävän virran käyrämuotoa sekä spektriä samalta ajan hetkeltä kuin edellä käsiteltiin jännitteestä. Seuraavassa kuvassa nähdään vaihevirtojen käyrämuodot 690 V:n jänniteportaassa ennen verkkomuuntajaa sekä kuvassa 37 vastaavasti virtojen spektri.



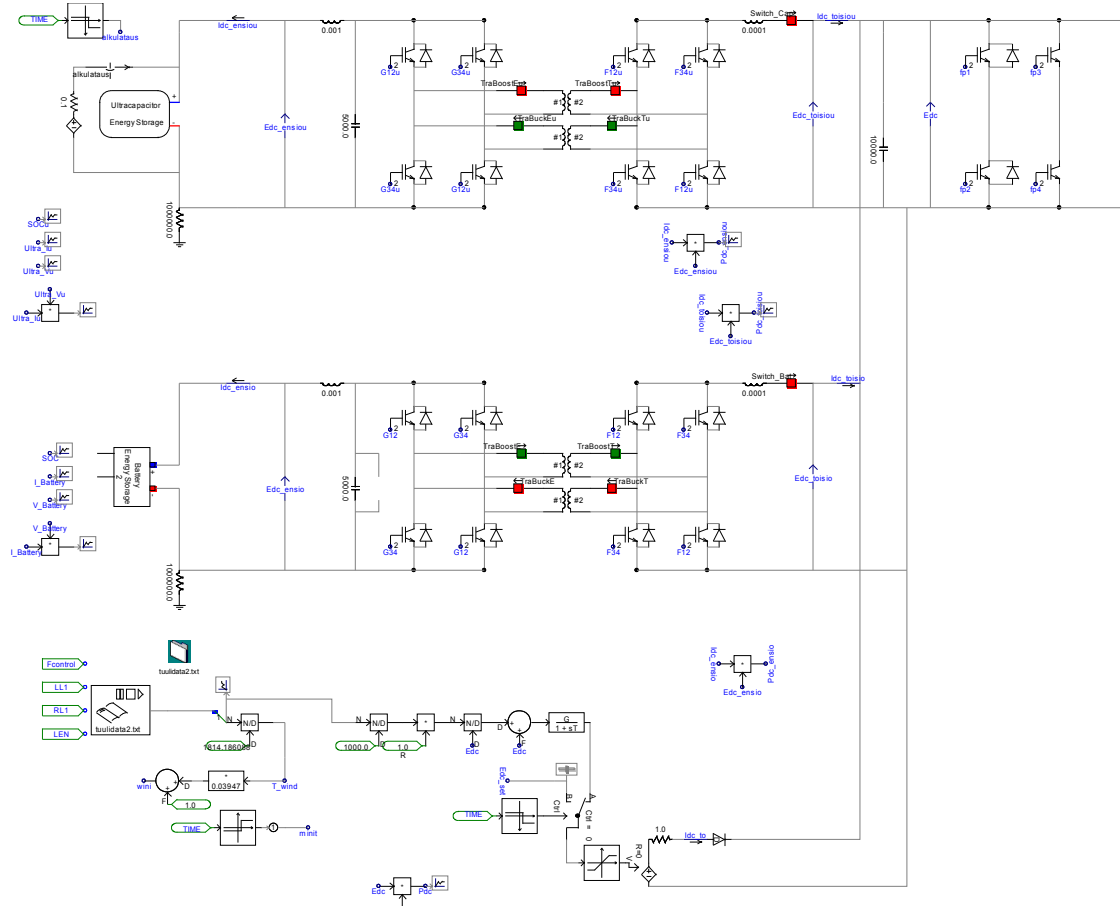
Kuva 36. Verkkoon syötettävien vaihevirtojen käyrämuodot 690V:n jänniteportaassa.



Kuva 37. Verkkoon syötettävien vaihevirtojen FFT ajanhetkellä $t=26s$.

3.3 Energiavaraston sisältävä taajuusmuuttaja tuulivoimalan verkkoon kytkennässä

Energiavarastoina toimivat tämän mallin mukaisesti superkondensaattorit sekä akusto. Akkuina tässä VTT:n toimittamassa mallissa on käytetty lyijyakkuja. Energiavarastot lisättiin edellä läpikäydyn taajuusmuuttajakytkennän jännitevälipiiriin galvaanisesti erotetuilla jännitettä nostavilla ja laskevilla katkojilla. Energiavaraston kytkeytyminen malliin nähdään kuvassa 38.

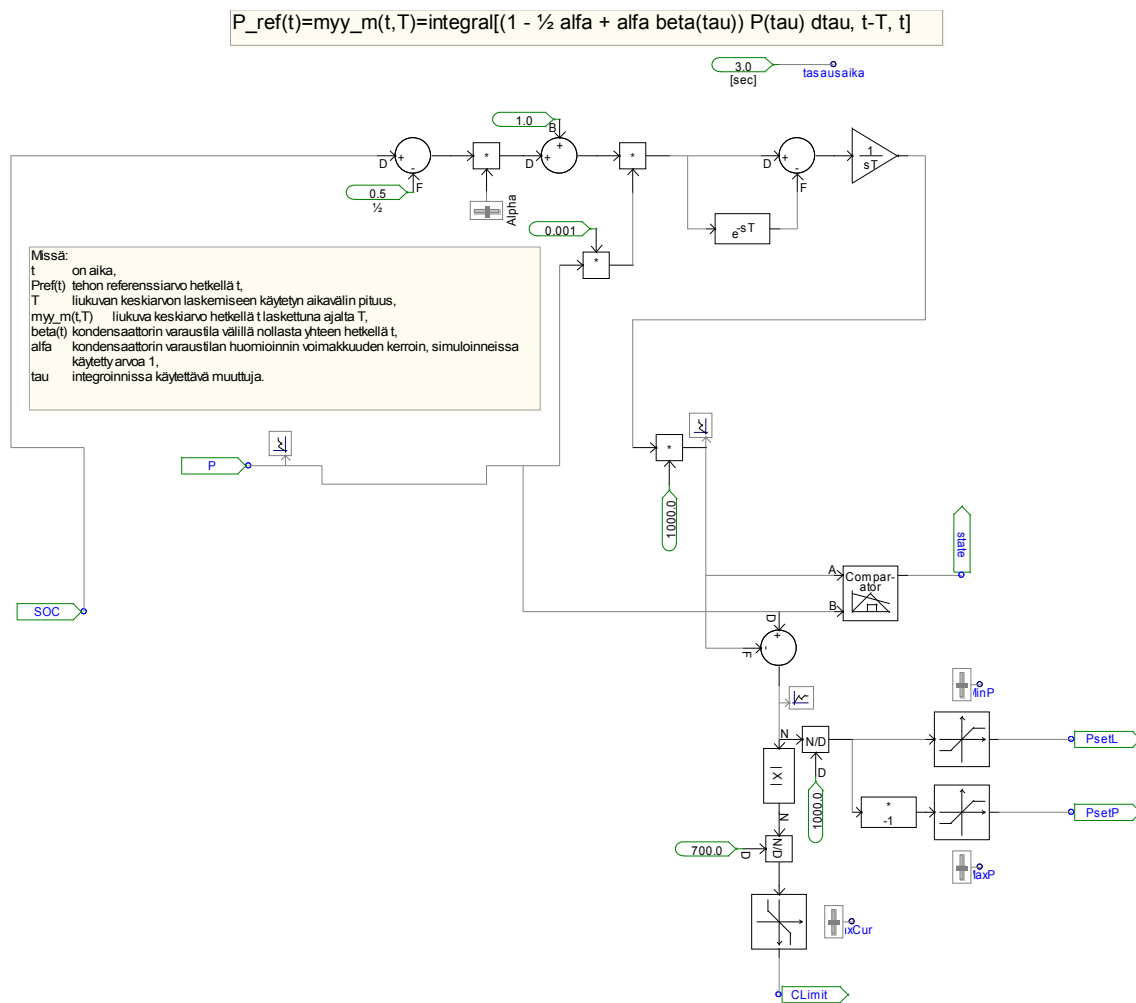


Kuva 38. Energiavarastojen kytkettyminen jännitevälipiiriin.

Tehonsyöttö toteutettiin tässä mallissa suoraan välipiiriin samalla kytkennällä kuin alaluvussa 3.2, pelkän taajuusmuuttajan tapauksessa. VTT:n toimittamassa energia-varastomallissa energiavarastoja varten oli oma verkkovaihtosuuntaajansa ja epätahti-generaattori oli kytketty suoraan tämän kanssa rinnakkain syöttämään verkkoa ilman taajuusmuuttajaa. Tässä tapauksessa haluttiin generaattorin teho syöttää taajuusmuuttajan kautta kuten edellisessäkin kohdassa. Lisäksi oli mielekästä yrittää käyttää saman taajuusmuuttajan verkkovaihtosuuntaajaa myös energiavarastojen verkkoon syöttämiseen. Tästä seurasi suuria muutoksia energiavarastojen ohjausperiaatteisiin. Verkkovaihtosuuntaajan ohjaus pidettiin samanlaisena kuin pelkän taajuusmuuttajan kytkennässä, mutta energiavarastoiden lataus- ja purkaustoimintojen ohjausjärjestelmä jouduttiin muuttamaan teho-ohjeella toimivaksi välipiirin jännitteen sijasta. Teho-ohje laskettiin samalla tapaa kuin VTT:n energiavarastomallissa verkkovaihtosuuntaajan ohjauksessa. Mallin toteutuksessa pyrittiin tässä vaiheessa vain loogisesti toimivaan

kokonaisuuteen. Käytettyjä ohjausperiaatteita ja -parametreja voisi jatkossa kehittää edelleen vastaamaan haluttua todellista laitteistoa, esimerkiksi suunnitelmiin ja mittauksiin perustuen.

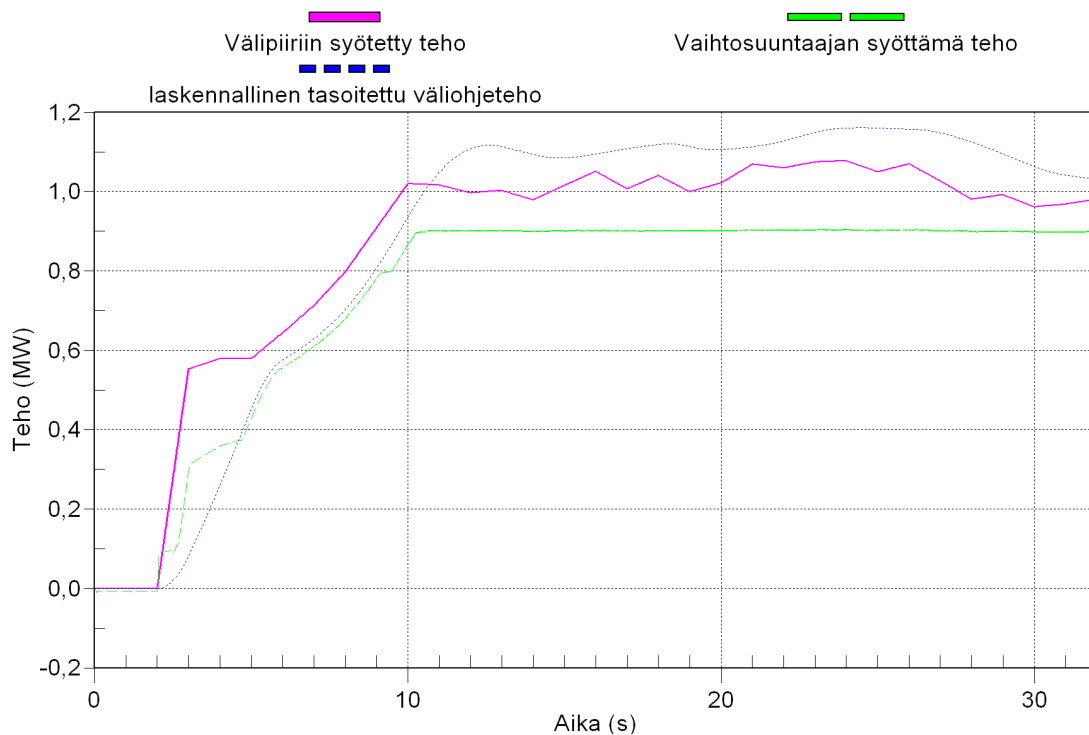
Tässä mallissa superkondensaattorit ovat koko ajan joko purkaus- tai lataustilassa. Niiden teho-ohje lasketaan asetellun ajan liukuvan tehokeskiarvon ja hetkellisen tehon erotuksena kuvan 39 mukaisesti. Akkuja ladataan välipiiriin syötettävän tehon ylittäessä asetetun 900 kW:n ylärajan ja puretaan vastaavasti tehon alittaessa asetetun 350 kW:n alarajan. Näiden rajojen käytännöllisyyttä pitkällä aikavälillä tehotaseen mielessä ei tutkita tässä simulaatiossa. Käytettävissä olevien 18 tunnin mittaustietojen perusteella tuotettu teho näyttää olevan ajallisesti useammin alle alarajan kuin yli ylärajan. Tämä tarkoittaisi akkujen tyhjenemistä ennemmin tai myöhemmin, ellei akkuja ladata välillä muulloinkin. Esimerkiksi äkillisissä tehon nousuissa, joissa ei kyetä tasoittamaan tehon muutosnopeutta pelkillä superkondensaattoreilla, voidaan ladata lisäksi akkuja. Kuitenkaan akkuja ei pureta muulloin kuin tehon alittaessa asetetun alarajan.



Kuva 39. Verkkoon syötettävän tehon tasoittamiseksi superkondensaattoreiden ohjaus laskettiin liukuvan keskiarvon perusteella. (Muokattu VTT:ltä saadusta mallista)

Energiavarojen lataus- ja purkauspiirit koostuvat muuntajia sisältävistä tasasähkökatkoista. Latausta ja purkamista varten on erilliset muuntajansa virran kulkemisen mahdollistamiseksi molempiin suuntiin hallitusti. Superkondensaattoreiden purkaminen, eli tehon syöttö verkkoon, osoittautui mahdottomaksi käytetyllä kytkennällä niiden varaustilan ollessa alle 50 %. Tämä johtuu siitä, että tällöin myös niiden jännite on alle puolet nimellisestä ja jää siten pienemmäksi, kuin muuntajan muuntosuhteella tarvittava minimijännite virran kulkemisen mahdollistamiseksi jännitevälipiiriin päin. Tätä voidaan korjata muuttamalla muuntajan muuntosuhdetta tai käyttämällä erilaista katkojen rakennetta. Tässä simulaatiossa superkondensaattoria ladataan simulaation

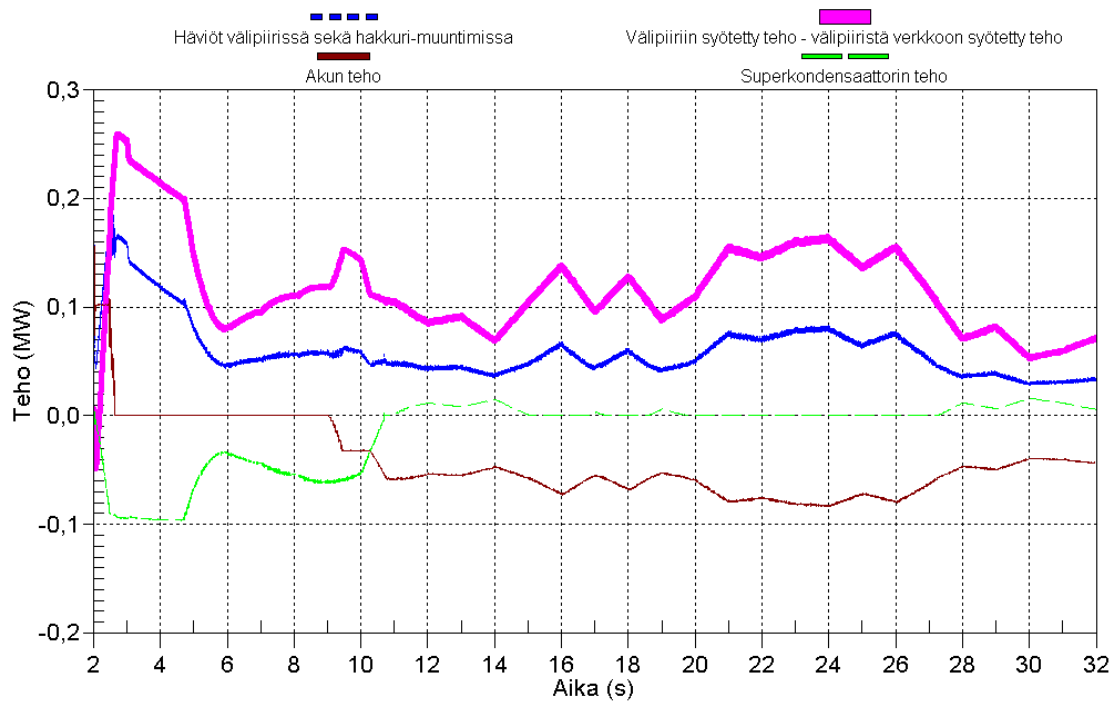
alussa lähelle 50 % varaustilannetta 2 sekunnin ajan, jonka jälkeen vasta käynnistyy varsinainen simulaatioajo. Kuvassa 40 on esitetty tuulivoimalan teho, vaihtosuuntaajan syöttämä teho sekä superkondensaattorien tehontasauspiirin laskema tasoitettu teho-ohje.



Kuva 40. Energiavaraston tehot sekä superkondensaattorien tasoituslaskennan periaate.

Kuvassa 41 on esitetty energiavarastojen tehoja sekä tehojen erotuksia häviöiden selvittämiseksi. Energiavaraston tehon ollessa negatiivinen kyseistä varastoa ladataan. Häviöt on laskettu solmupisteeseen liittyvien tehojen summana. Tuulivoimalan välipiiriin syöttämä teho sekä energiavarastoista otettu teho on siis laskettu yhteen ja summasta vähennetty verkkovaihtosuuntaajan syöttämä teho. Tässä mallissa ei ole otettu huomioon mm. voimalaitoksen eri osien välisten johtimien impedansseja ja niissä syntyviä häviöitä.

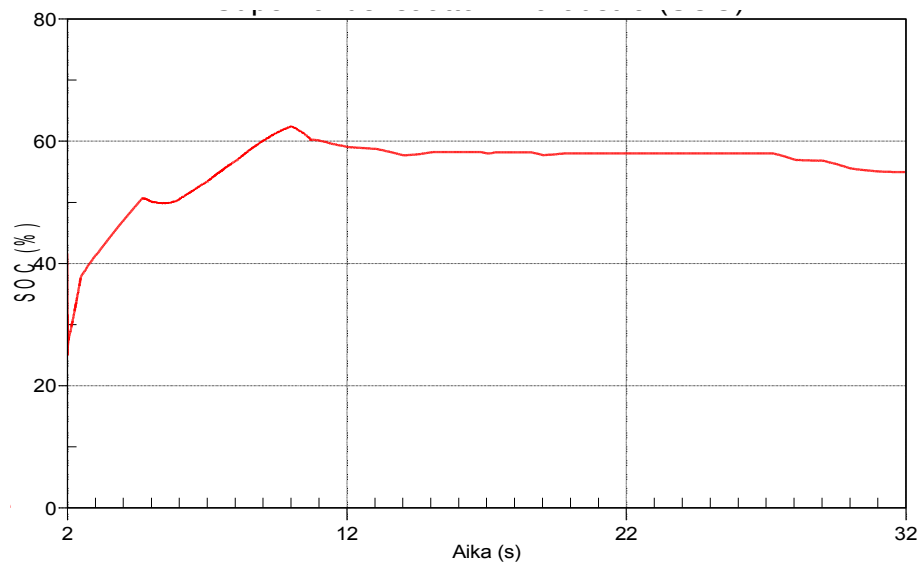
Superkondensaattorien lataaminen simuloinnin alkuosan jyrkässä tehon nousussa rajoittuu kondensaattorille asetettuun suurimpaan sallittuun latausvirtaan. Kondensaattorin ollessa tyhjä, eli jännite lähellä nollaa, rajoittuu latausvirta suurimpaan arvoonsa ilman, että kondensaattorilla pystytään merkittävästi tasaamaan tehon nousua.



Kuva 41. Energiavarojen tehotaseita sekä häviölaskenta.

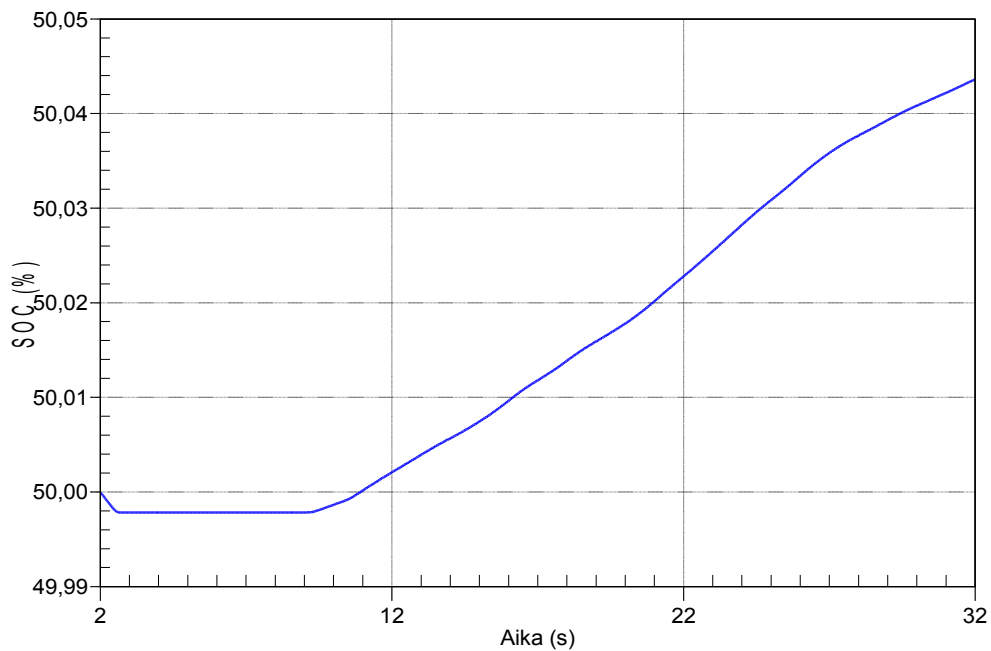
Tämä rajoitus johtuu siitä, että superkondensaattoreihin syötettävä teho on suoraan sen jännitteen ja virran tulo.

Kuvassa 42 on superkondensaattorin varaustilan (State of Charge, SOC) muuttuminen tämän simulaatioajan aikana. Lataus- ja purkaustoimintojen tarkan testaamisen kannalta olisi mielekästä saada ajettua pidempiä simulointiajoja, kuin tämän työn tekemiseen valituilla työkaluilla oli käytännössä mahdollista.



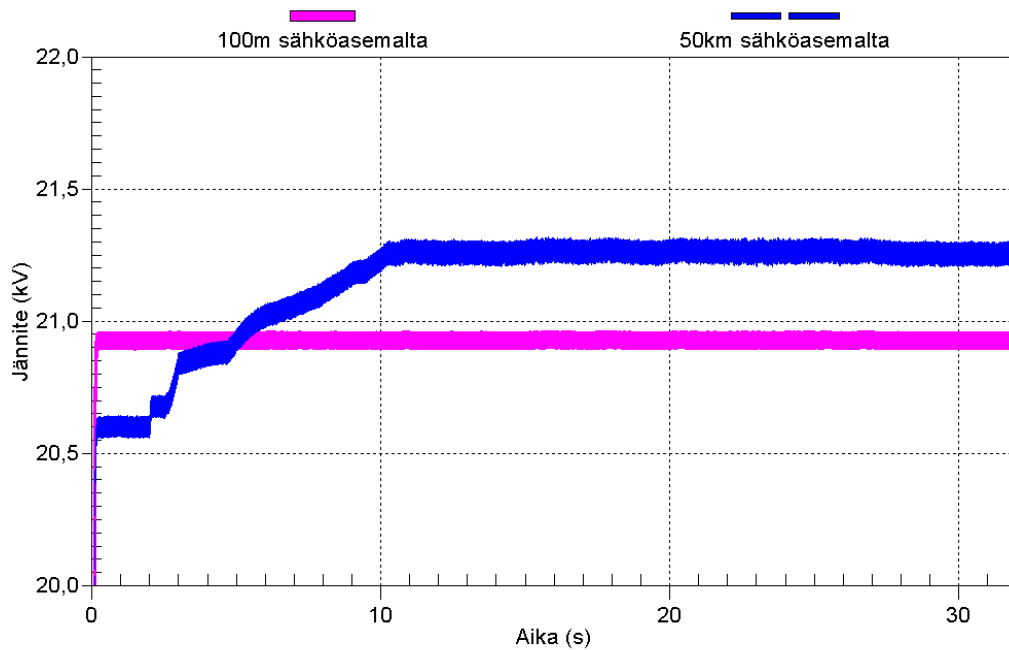
Kuva 42. Superkondensaattorin varaustilan (SOC) muuttuminen simuloinnin aikana.

Kuvan 43 mukaisesti akun varaustilanne lähtee aluksi laskemaan ensimmäisen sekunnin aikana tehon ollessa alle asetetun alarajan. Tehon saavuttaessa asetetun ylärajan alkaa akun latausprosessi. Tässä tehon ylittäessä vain vähäisesti asetettu yläraja kestää akun latautuminen pitkän aikaa eikä näin lyhyessä ajossa saada esiin muuta kuin indikaatio järjestelmän toimivuudesta (vrt. kuvan 43 pystyakselin asteikko).

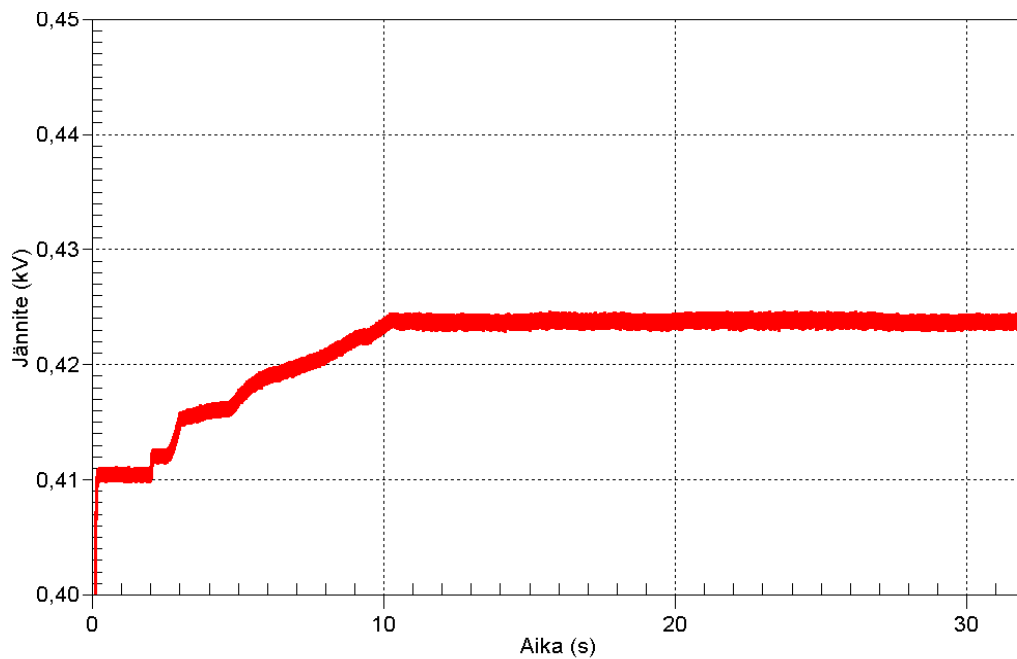


Kuva 43. Akun varaustilan (SOC) muuttuminen simuloinnin aikana.

Energiavarastojen verkkovaikutuksista näkyvin on jännitteen vaihtelun väheneminen. Kuvassa 44 näkyy keskijännitteen vaihtelu tuulivoimalan sisältävän lähdön 1 molemmissa päissä. Vastaavasti kuvassa 45 nähdään jännitteen vaihtelu lähimmällä kuluttajalla. Verrattaessa näitä kuvia aikaisempiin, ilman energiavarastoja tehtyihin simulaatioihin alaluvuissa 3.1 (kuvat 19 ja 20) ja 3.2 (kuvat 30 ja 31), huomataan jännitteen vaihtelussa pehmeämpiä muutoksia sekä ennen kaikkea nähdään jännitteen nousun jäävän aikaisempaa pienemmäksi.

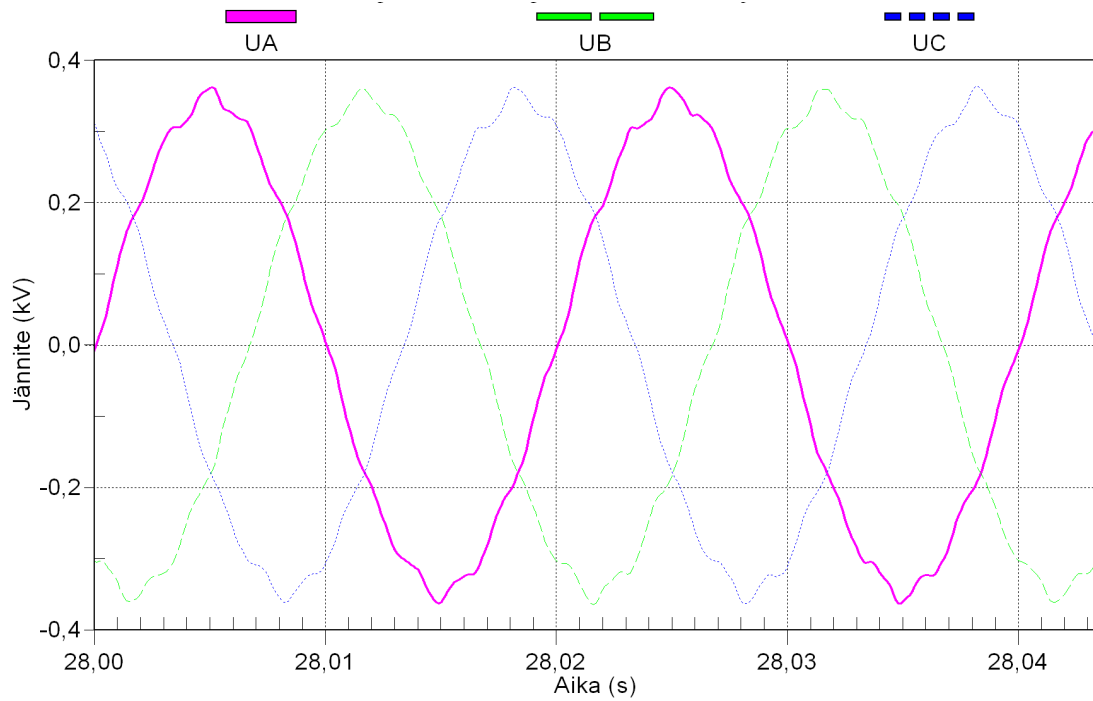


Kuva 44. Keskijännitteen tehollisarvon vaihtelu lähdön 1 päissä.

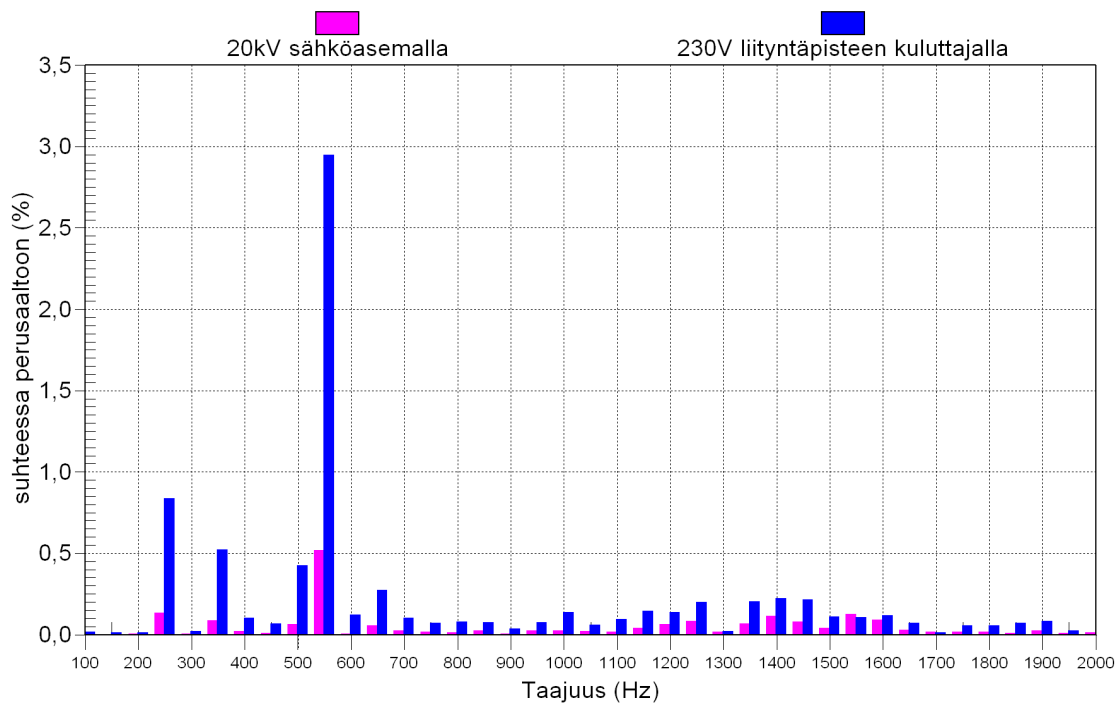


Kuva 45. Kuluttajalla näkyvä pääjännitteen tehollisarvon vaihtelu energiavarastojen ollessa mukana.

Kuluttajan vaihejännitteen käyrämuoto on sinänsä samanlainen kuin pelkän taajuusmuuttajan tapauksessa. Tämä on näkyvissä kuvassa 46. Yliaaltopitoisuus vastaa myös käyrämuodon tavoin pelkän taajuusmuuttajan yliaaltopitoisuutta. Kuluttajan ja sähköaseman jännitteen spektri on nähtävissä kuvassa 47.



Kuva 46. Kuluttajan vaihejännitteen käyrämuoto.



Kuva 47. Jännitteen yliaaltopitoisuus liittytapisteen kuluttajalla sekä lähdön 1 alussa sähköaseman päässä.

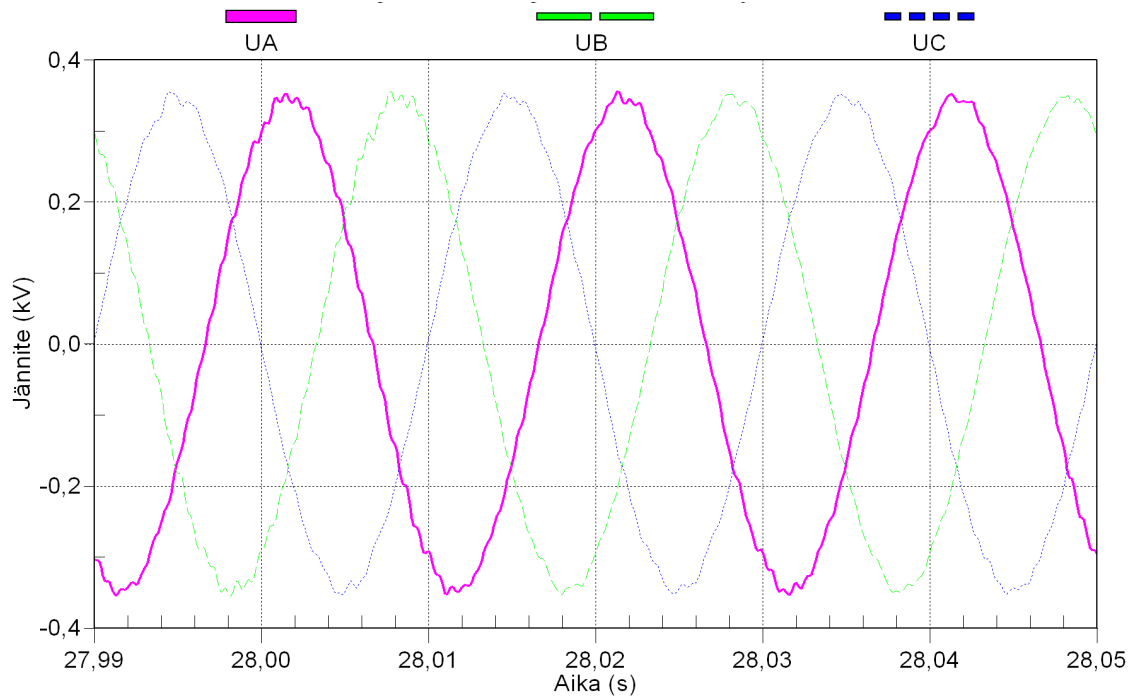
Spektrin numeeriset arvot sekä jännitteen kokonaissärö (THD) on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Vaihejännitteen kokonaissärö (THD) sekä yliaaltokomponenttien suhteelliset pitoisuudet. Sähköaseman päässä (SA), lähimmällä kuluttajalla (KU).

Pisteen nimi	THD %	Harmoniset yliaallot					
		%H3	%H5	%H7	%H9	%H11	%H13
20 kV SA	0,60017	0,00088	0,12953	0,08230	0,00563	0,51642	0,05140
400 V KU	3,2012	0,00898	0,83522	0,51819	0,06251	2,94487	0,27149

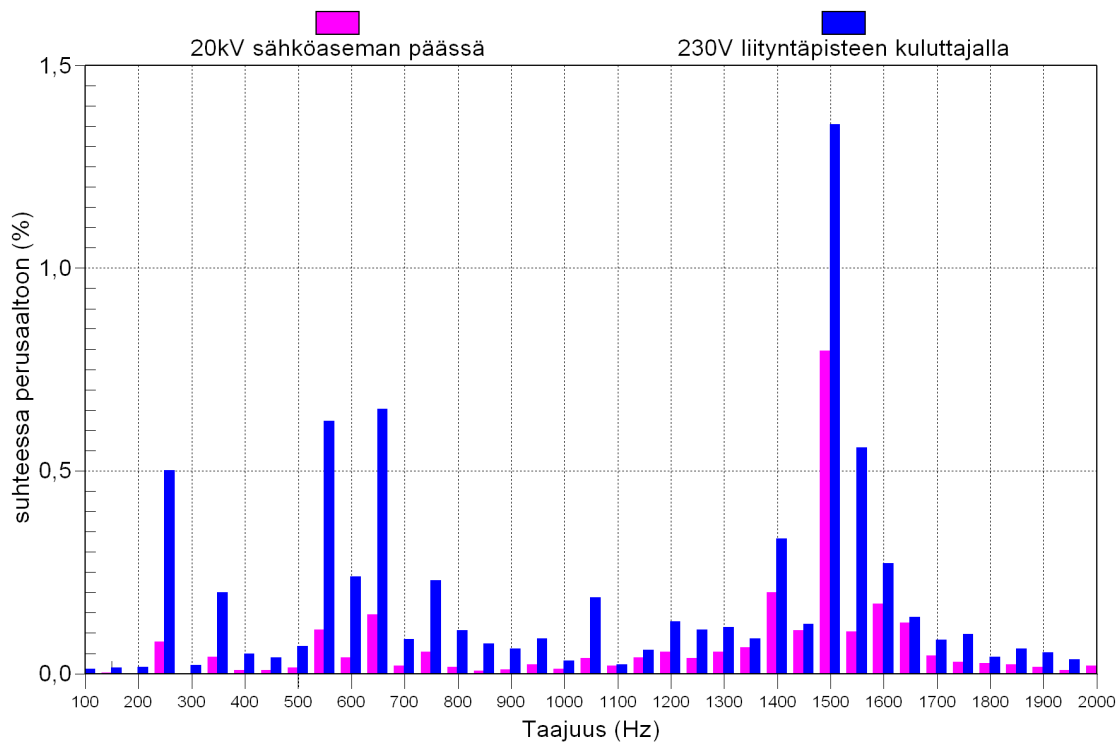
3.4 Energiavaraston ja sähkönlaatuaseman sisältävä taajuusmuuttaja tuulivoimalan verkkoon kytkennässä

Sähkönlaatuaseman lisääminen tuulivoimalan energiavaraston yhteyteen ei muuta sinänsä tuulivoimalan aiheuttamaa jännitteen nousua lähimmällä kuluttajalla verrattuna alalukuun 3.3, jossa oli energiavarasto ja taajuusmuuttaja. Sen sijaan suurimman muutoksen sähkönlaatuasema aiheuttaa jännitteen ja virran käyrämuotoihin sekä näin ollen myös yliaaltopitoisuuksiin. Kuvassa 48 nähdään lähimmän kuluttajan jännitteen käyrämuoto, jota voidaan verrata alaluvussa 3.3 esitettyihin jännitteiden käyrämuotoihin (kuva 46).

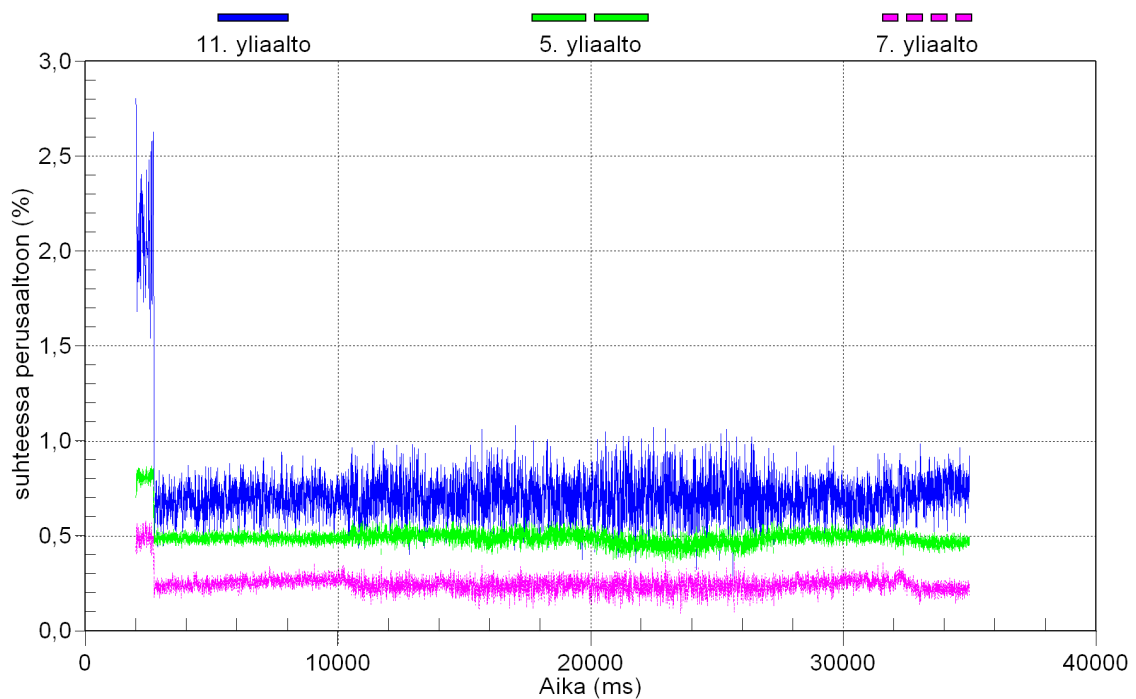


Kuva 48. Sähkönlaatuaseman korjaama jännitteen käyrämuoto lähimmällä kuluttajalla.

Jännitteen yliaaltopitoisuus kuluttajalla ja keskijännitelähdön alussa on nähtävissä kuvassa 49. Sähkönlaatuaseman vaikutus nähdään kuvassa 50, koska alussa sähkönlaatuaseman aktiivisuodatin oli pois päältä ja kytkettiin toimintaan n. 2,5 s kohdalla. Selvemmin sähkönlaatuaseman vaikutus nähdään verrattaessa keskenään alaluvun 3.2 taulukkoa 2 jännitteen kokonaissäröistä taulukkoon 4.



Kuva 49. Sähkönlaatuaseman lisäyksen jälkeinen vaihejännitteen spektri.

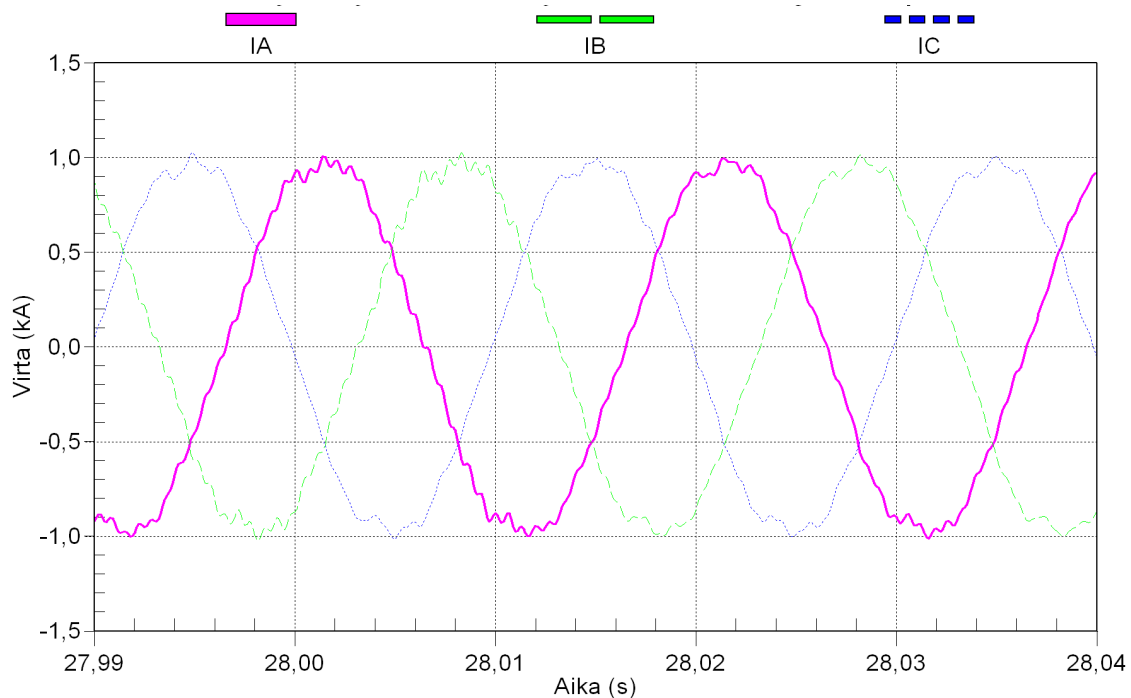


Kuva 50. Sähkönlaatuaseman lisäyksen vaikutus kuluttajan vaihejännitteen yliaalto-
toisuuteen sekä yliaaltojen ajallinen vaihtelu.

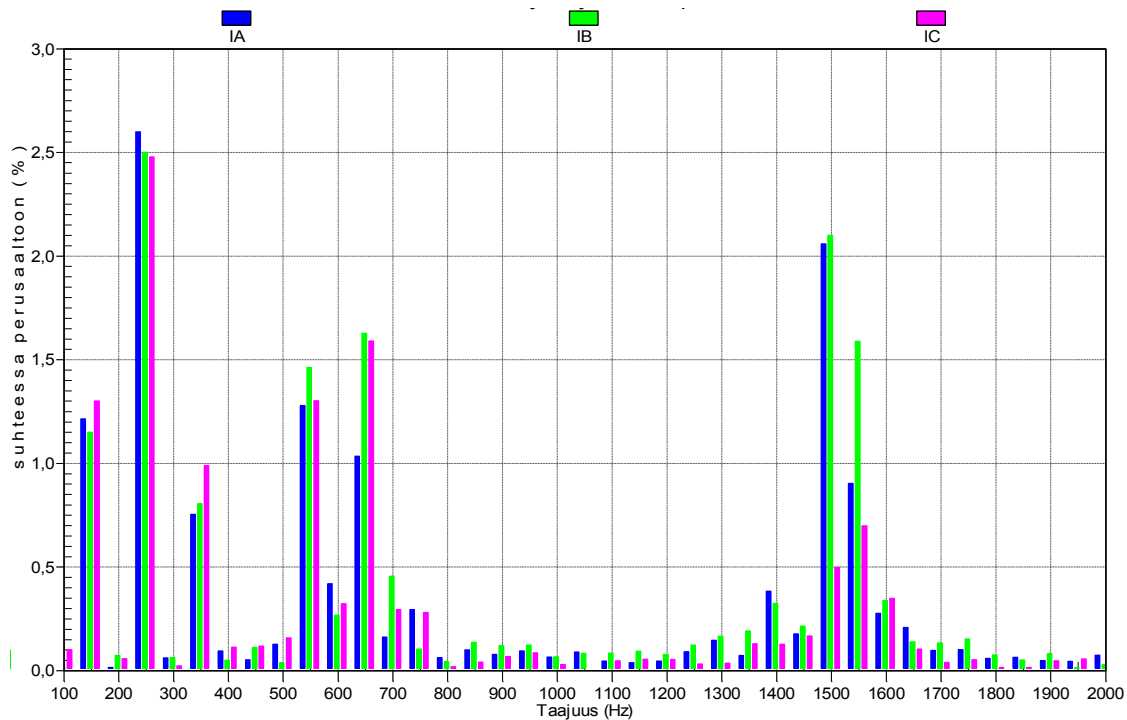
Taulukko 4. Vaihejännitteen kokonaissärö sekä harmonisten komponenttien suhteelliset osuudet perusaallosta sähkölaatuaseman lisäyksen jälkeen. 20 kV Sähköaseman päässä (SA), 400 V lähimmällä kuluttajalla (KU).

Pisteen nimi	THD %	Harmoniset yliaallot					
		%H3	%H5	%H7	%H9	%H11	%H13
20 kV SA	0,89635	0,001821	0,077953	0,040390	0,006597	0,106402	0,143894
400 V KU	1,93299	0,013738	0,500287	0,199825	0,039274	0,622306	0,650896

Aktiivisuodattimen toiminnallisuus tulee parhaiten esiin vertailemalla virran käyrämuotoa ja spektriä kuvissa 51 ja 52 alaluvun 3.2 vastaaviin kuviin 36 ja 37. Kuvissa 51 ja 52 edelleen näkyvät yliaalto-komponentit kertovat sähköverkossa toimivan aktiivisuodattimen parametrien virittämisen vaikeuksista, mutta suhteelliset yliaaltopitoisuudet ovat huomattavasti pienentyneet alemmilla taajuuksilla. Korkea-taajuisen värähtelyn poisto vaatii vielä säätäjien jatkokehittelyä ja virittämistä.



Kuva 51. Verkkoon syötetyn virran käyrämuoto sähkölaatuaseman aktiivisuodattimen korjauksen jälkeen.



Kuva 52. Virran spektri sähkölaatuaseman jälkeen 690 V jänniteportaassa hetkellä $t = 28$ s.

3.5 Yhteenveto tuulivoimalan energiavarastoista

Energiavaraston lisäyksellä tuulivoimalan taajuusmuuttajan jännitevälipiiriin saavutetaan merkittäviä parannuksia kuluttajan jännitetason vaihtelun pitämiseen kurissa. Toisin sanoen voidaan merkittävästi vähentää välkyntää sekä pienentää pitkien lähtöjen päässä olevien tuulivoimaloiden läheisyydessä mahdollisesti esiintyvää ylijännitettä. Energiavarastojen suuntaajien rakenteeseen sekä ohjaukseen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Häviöiden vähentämisen mahdollisuuksia kannattaa miettiä tarkasti sekä energiavarastojen toiminta-alueen laajuutta. Yksi vaihtoehtoinen suuntaajien ohjaustapa olisi verkkovaihtosuuntaajan muuttaminen lasketulla teho-ohjeella toimivaksi ja superkondensaattoreiden ohjaus välipiirin jännitteen mukaan. Akkuja voitaisiin ladata ja purkaa teho-ohjeella kuten nytkin, mutta myös muulloin superkondensaattorin tullessa täyteen tai ollessa muutoin riittämätön tekemään tarvittavaa tehon korjausta yksinään.

Yliaaltoja poistavan aktiivisuodattimen lisäys taajuusmuuttajan verkkovaihtosuuntaajan yhteyteen vähentää merkittävästi verkkoon aiheutettujen yliaaltojen määrää varsinkin matalammilla yliaaltotaajuuksilla. Taajuusmuuttajan ohjaustapa sekä kytkentätaajuus vaikuttavat verkon impedanssien ja suodattimien ohella siihen, mitä taajuuksia voidaan aktiivisuodattimella korjata. Korkeampien taajuuksien suodatus onnistuu tosin kohtuullisen hyvin passiivisilla suodattimilla. Näissä simulaatioissa jännitteen kokonaissärö lähdön alkupäässä kasvoi hiukan sekä energiavaraston että sähkönsäätöaseman lisäyksen yhteydessä. Kuitenkin tulokset pysyivät joka kohdassa reilusti alle standardissa SFS-EN 50160 määritellyn jännitteen THD:n raja-arvon 8 %. Enimmäkseen pysyttiin jopa korkealaatuisen sähkön THD:n raja-arvoksi määritetyn 3 % alapuolella. (Kivikko 2002.)

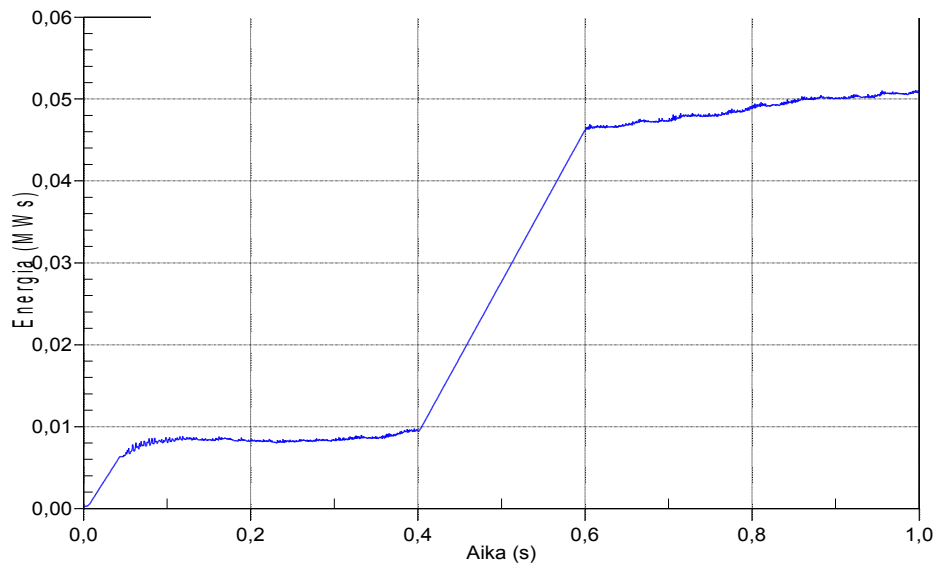
Verkkovaikutuksia tutkittiin tässä vain tietyillä toiminnallisesti tarkoituksenmukaisilla ohjaustavoilla ja järjestelmäkokoonpanoilla. Nämä simulaatioajat ovat suuntaa antavia ja tietyn todellisen laitteiston vaikutusten tarkka selvittäminen edellyttäisi yksityiskohtaista tietoa laitteiston kokoonpanosta ja ohjausjärjestelmistä. Toisaalta simulointien avulla voidaan myös laajemmin kartoittaa erilaisten vaihtoehtoisten ratkaisujen edut verkkovaikutusten kannalta.

4 SÄHKÖNLAATUASEMA PIENJÄNNITEVERKOSSA

Tässä simulointitutkimuksessa tavoitteena oli tarkastella diplomityössä (Hätönen 2005) hahmotellun energiavarastoihin perustuvan sähkönlaatuasemakonseptin verkkovaikutuksia käyttäen Pscad-simulointityökalua. Mielenkiinnon kohteena olivat verkkovaikutusten ohella myös keskeisimmät kyseiseen konseptiin perustuvan sähkönlaatuaseman mitoitusperiaatteet tutkittavien sähköverkon ilmiöiden kannalta.

Sähkönlaatuaseman aktiivisuodattimen viritys onnistui hyvin suoraan äärettömän jäykkään verkkoon asennettuna, eli testattaessa jännitelähteeseen kytkettynä. Integroitaessa laatuaseman mallia pienjänniteverkon malliin huomattiin jännitteen ja virran käyrämuotojen samanaikainen korjaus vaikeaksi suodattimien ja säätäjien parametrien kannalta. Verkossa esiintyvien impedanssien välityksellä virran käyrämuodon korjaus aiheuttaa myös vääristymää jännitteeseen. Jännitteen käyrämuodon korjaajan muutokset näkyvät vastaavasti myös virrassa. Lisäksi jonkin verran vaikuttaa molemmille vaihtosuuntaajille yhteisen jännitevälipiirin kautta tapahtuva vuorovaikutus. Nämä vaikeudet näkyvät jännitteen käyrämuodossa sähkönlaatuaseman ollessa kytkettynä syöttävään sähköverkkoon ja jännitteen korjauksen ollessa käytössä.

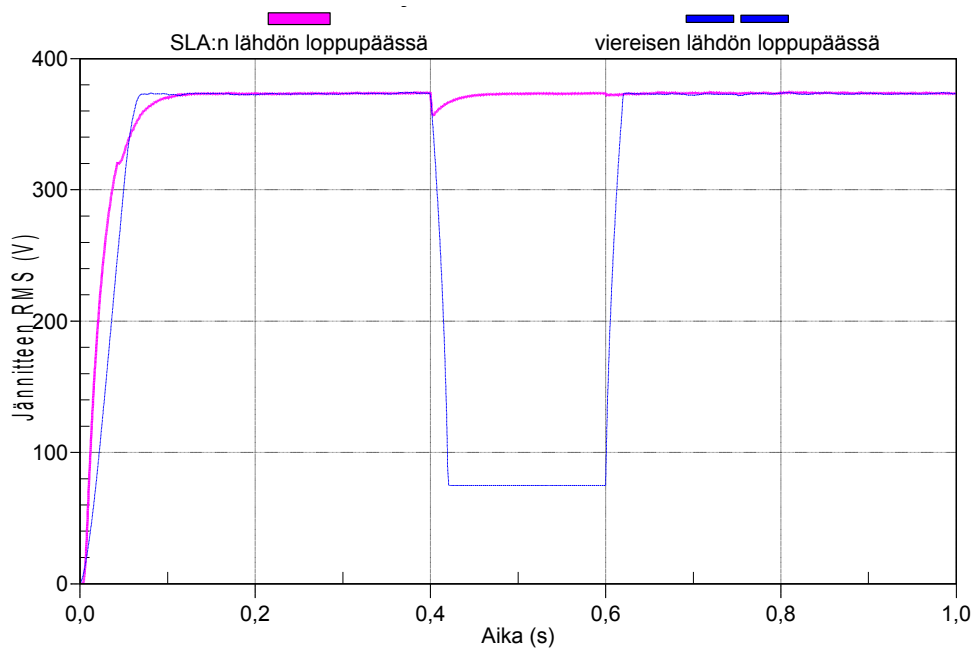
Energiavaraston mitoitukseen saadaan suuntaa antava vastaus kuvan 53 perusteella. Verkossa esiintyi 0,2 s pituinen vika, jonka aikana sähkönlaatuasema kytkeytyi saarekekäyttöön toimien lähdön 1 UPS:na. Kuvasta voidaan lukea tälle aikavälille tarvittava energiamäärä, joka simulointitilanteessa oli n. 36 kWs. Akuston jännitetaso valinnan mukaan saadaan laskettua akkujen tarvittava kapasiteetti jakamalla tarvittava energia käytettävällä jännitteellä. Jos esimerkiksi käytettäisiin 380 V akustoa, tarvittaisiin tuon kyseessä olevan katkoksen ylittämiseen vähintään 0,03 Ah akusto. Näin lyhyet katkokset voitaisiin toteuttaa käyttäen myös superkondensaattoreita energiavarastona.



Kuva 53. Sähkönlaatuaseman energiavaraston mitoitukseen käytettävä jännitevälipiirin energiaa mittaava käyrä. UPS-toiminta välillä 0,4–0,6 s.

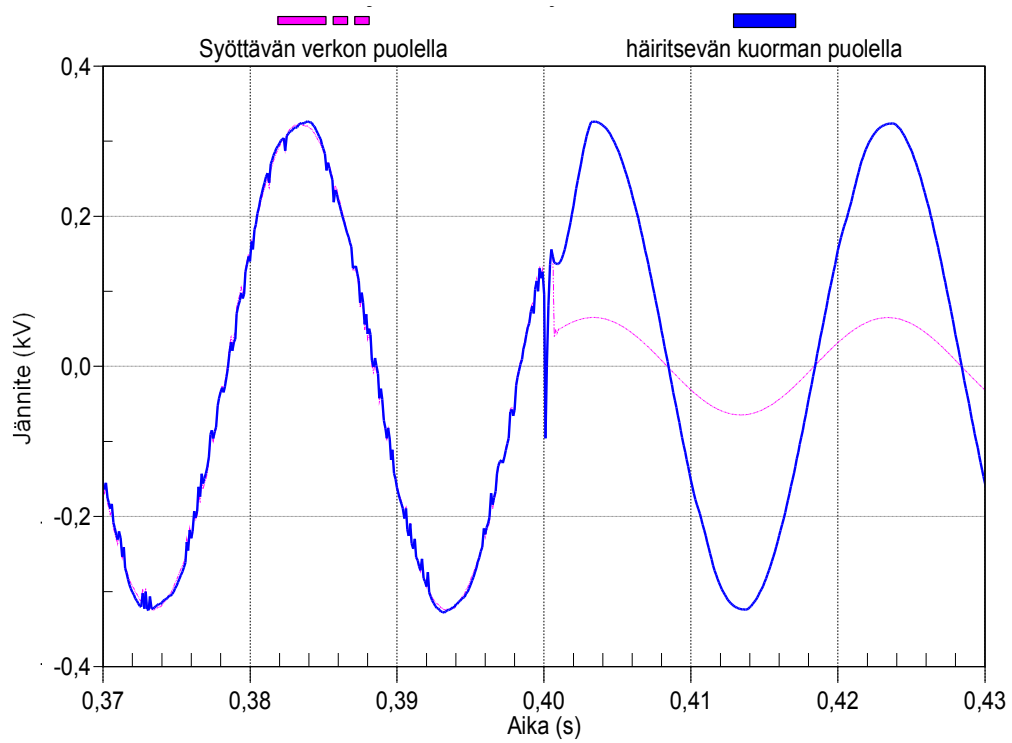
4.1 Vika keskijänniteverkossa

Syöttävän keskijänniteverkon puolelle tehtiin simulaatiossa kolmivaiheinen vika, joka ilmeni jännitteen putoamisena 20 %:iin nimellisestä. Tämän vian vaikutukset sähkönlaatuaseman syöttämään lähtöön sekä viereiseen lähtöön ovat nähtävissä kuvassa 54.

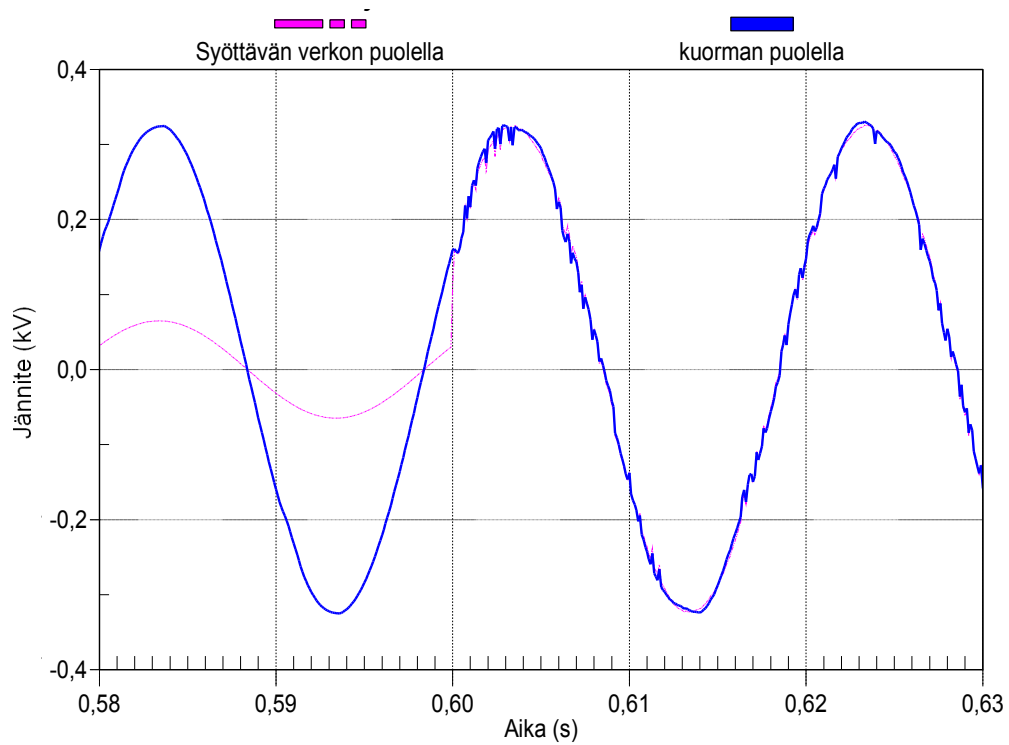


Kuva 54. Keski-jänniteverkossa vika, jolloin jännite romahtaa 20 %:iin nimellisestä ajaksi 0,4–0,6 s. Sähkönlaatuasemalla (SLA) suojatun lähdön lopussa vika näkyy huomattavasti vähemmän.

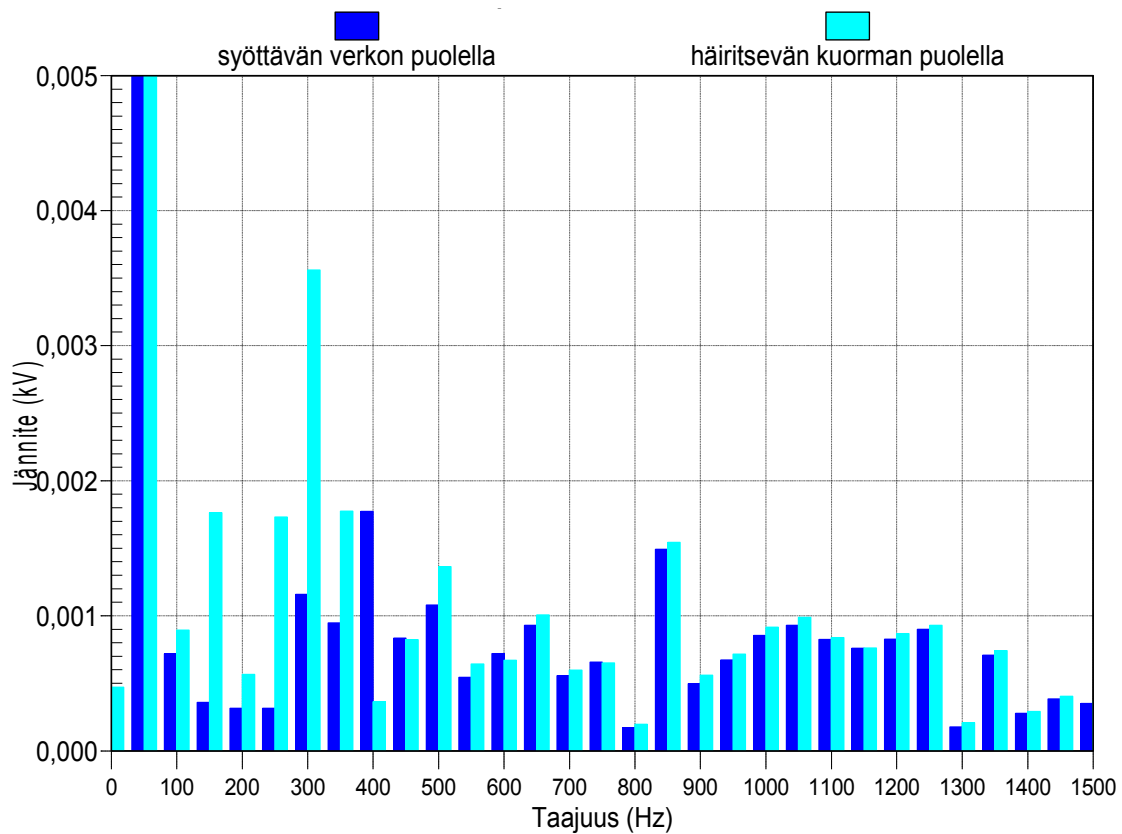
Sähkönlaatuaseman toimintaa kuvaavat jännitteen käyrämuodot vian alku- ja loppu-hetkellä on esitetty kuvissa 55 ja 56. Näissä toimintatila vaihtuu siis ensin UPS-käyttöön vian alussa ja sitten takaisin normaalikäyttöön vian poistuttua. Normaalikäytön aikaiset vaihejännitteen yliaaltojen suuruudet selviävät kuvasta 57. Jännitteen käyrämuodossa nähdään siniaallosta selvästi poikkeavia teräviä lovia sekä syöttävän verkon että kuorman puolella. Nämä vaikutukset ovat nähtävissä myös jännitteen spektrissä. Tämä johtuu verkon impedanssien suhteellisen suuresta arvosta verrattuna sähköaseman jännitteen ja virran korjauksen väliseen impedanssiin sekä säätimien parametrien kompromissi-arvoista. Tässä simulaatiossa valittiin tärkeämmäksi tasoittaa verkosta otettava virta lähes puhtaasti sinimuotoiseksi, jolloin jännitteeseen jäi kuvan 55 alkuosassa ja kuvan 56 loppuosassa näkyviä häiriöitä. Säätäjien hienosäädöllä voidaan päästä vielä parempiin tuloksiin.



Kuva 55. Jännitteen käyrämuoto vian alkaessa $t = 0,4$ s.

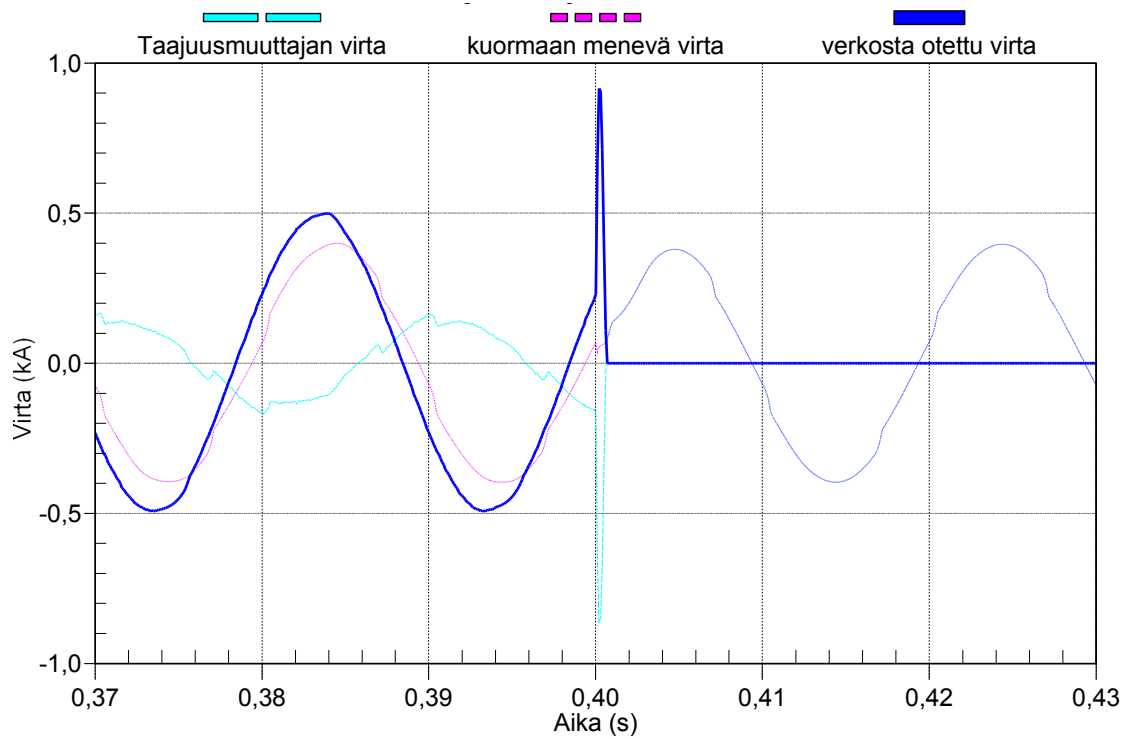


Kuva 56. Jännitteen käyrämuoto vian poistuessa $t = 0,6$ s.

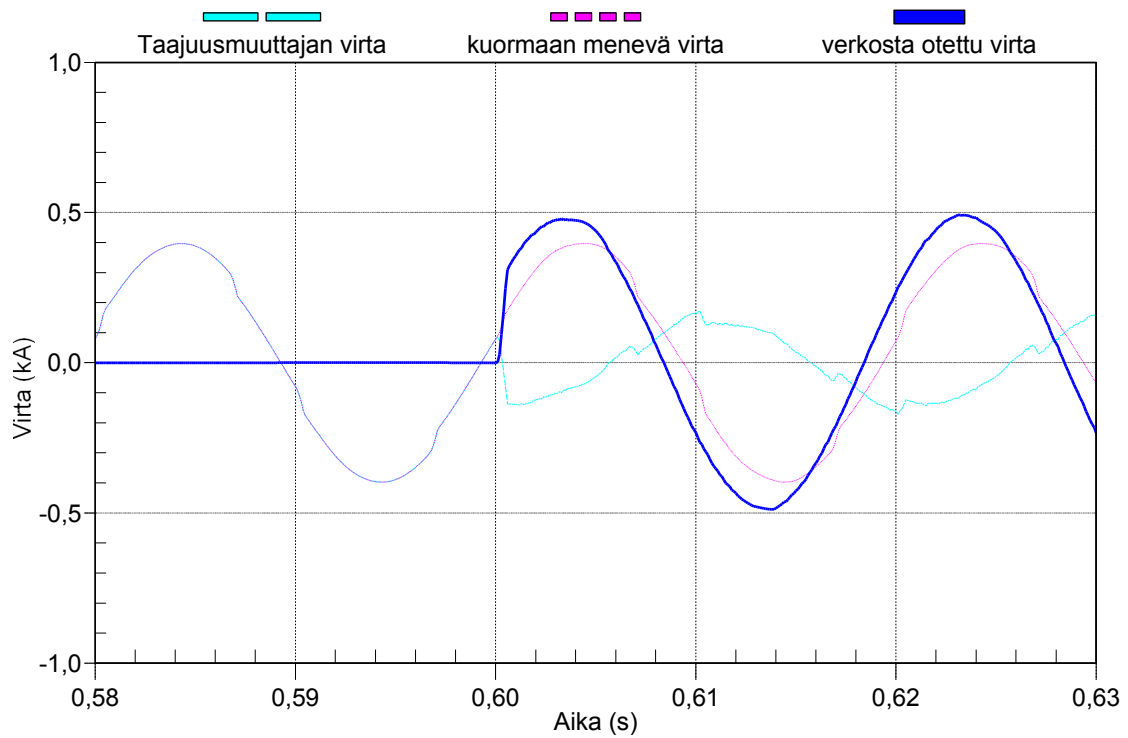


Kuva 57. Vaihejännitteen spektri jatkuvan toiminnan alueella ajanhetkellä $t = 0,61$ s.

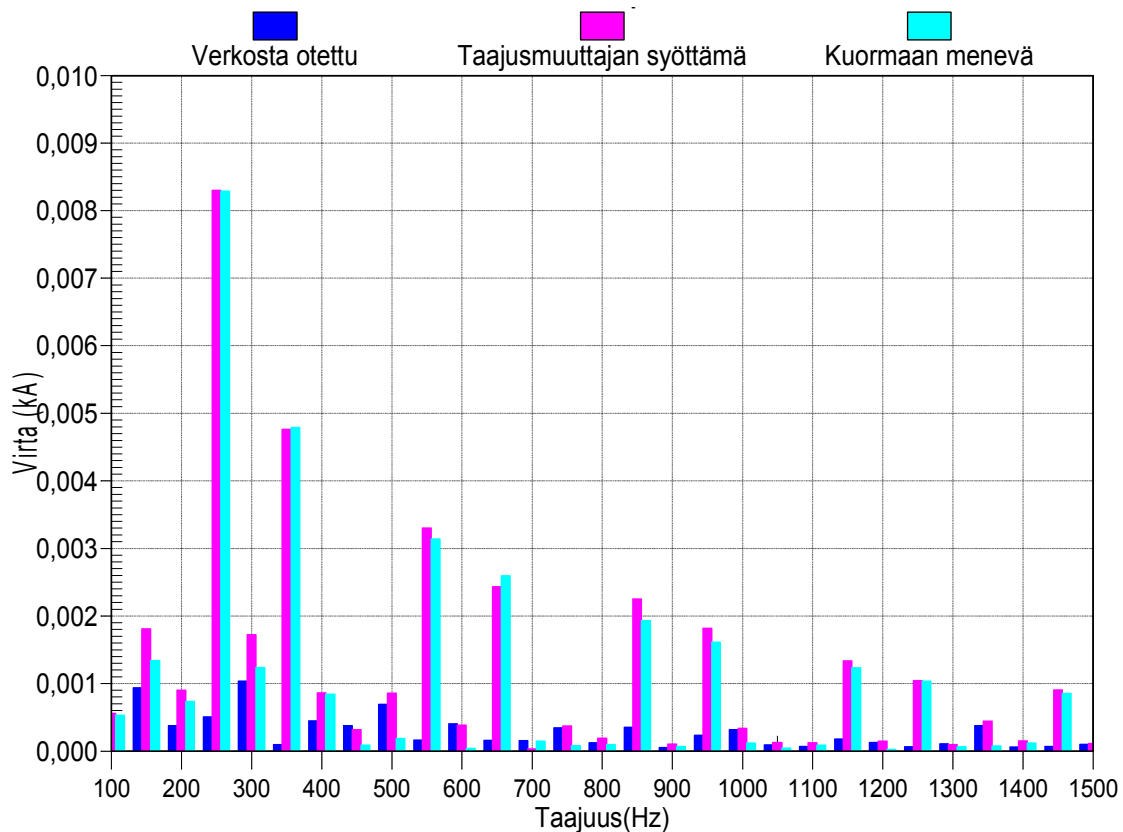
Vastaavat virtojen käyrämuodon on esitetty kuvissa 58 ja 59. Samoin normaalikäytön aikaiset virtojen yliaaltojen suuruuden selviävät kuvasta 60. Virran spektristä nähdään, kuinka verkosta otettavat yliaallot on saatu häviämään lähes olemattomiin ja kuormituksen tarvitsemat yliaallot syötetään sähkönlaatuaseman rinnakkaisvaihtosuuntaajalta.



Kuva 58. Virran käyrämuoto vian alkaessa $t = 0,4$ s.



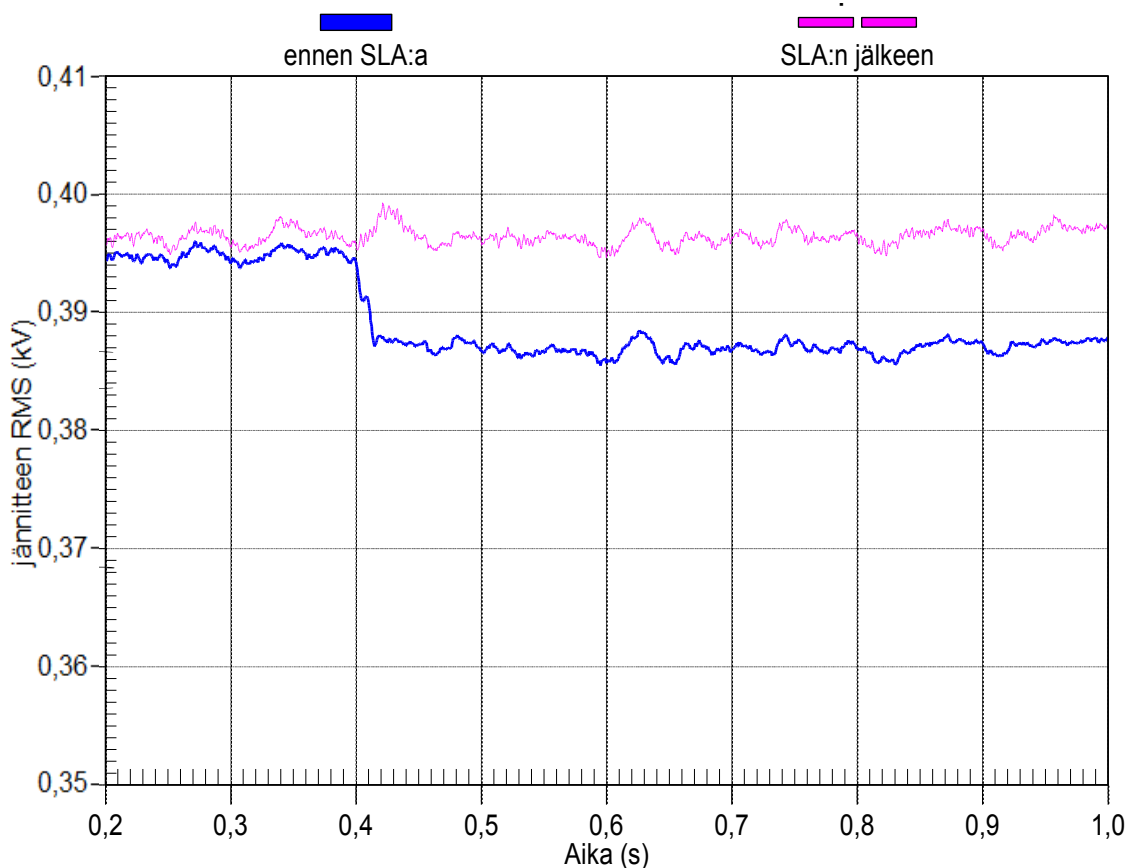
Kuva 59. Virran käyrämuoto vian poistuessa $t = 0,6$ s.



Kuva 60. Sähkönlaatuaseman toimiessa jatkuvan toiminnan alueella virtojen yliaaltojen suuruudet mitattuna eri haaroista ajanhetkellä $t = 0,61$ s.

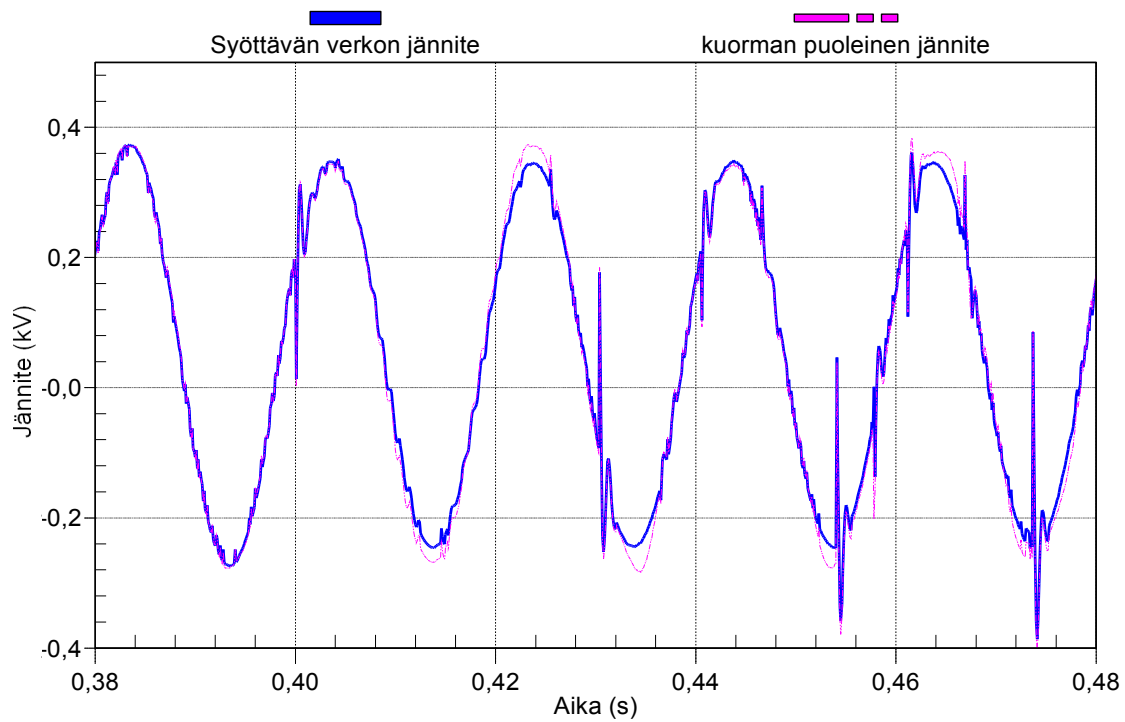
4.2 Viereisen lähdön viat

Sähkönlaatuaseman viereisen lähdön loppupäähän aiheutettiin simulaatiossa yksi-vaiheinen maasulkuvika ajanhetkellä $t = 0,4$ s. Tämä vika ei ehtinyt aiheuttaa lähdön 2 sulakkeiden palamista vielä 0,6 s kuluessa, mutta jännitteen alenema näkyy silti selvästi muuntamon jännitetasossa seuraavan kuvan mukaisesti. Sähkönlaatuaseman jännitetasen korjaus toimii ja laatuaseman perässä olevassa lähdössä saadaan nauttia normaalista jännitetasosta viereisen lähdön viasta huolimatta.

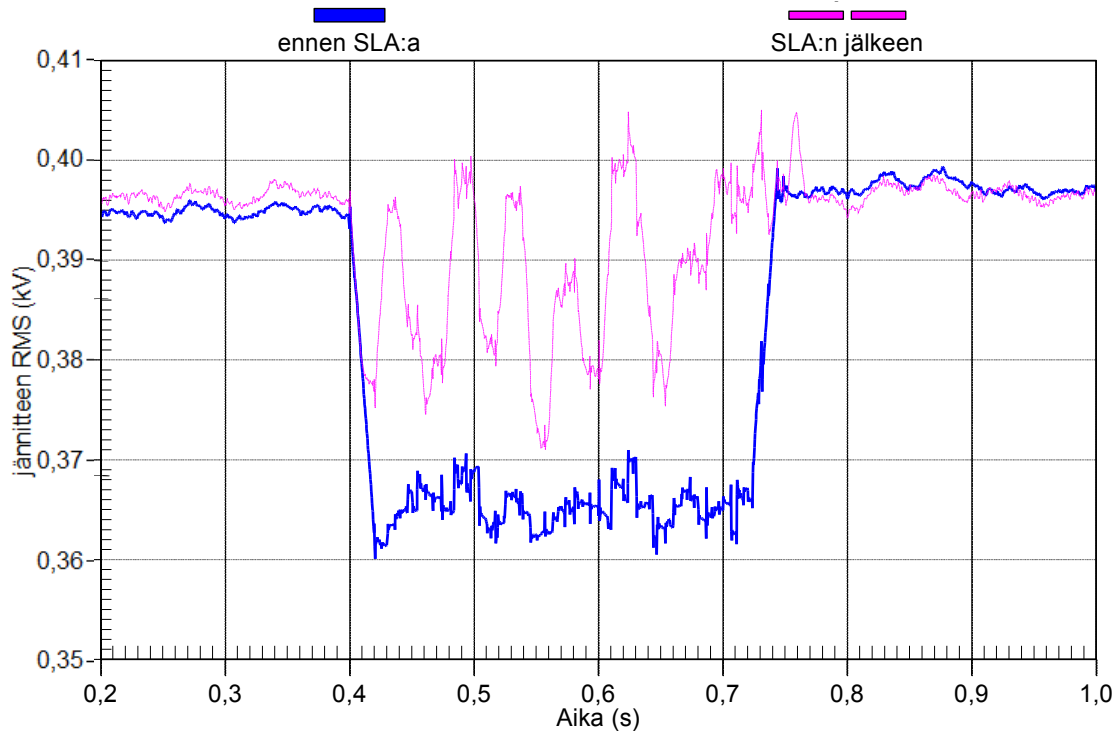


Kuva 61. Jännitteen tehollisarvo ennen sähkölaatuasemaa ja sen jälkeen, kun yksivaiheinen maasulku alkaa viereisen lähdön lopussa ajassa $t = 0,4$ s.

Toisessa simulaatioajossa viereiseen lähtöön aiheutettiin keinotekoinen kolmivaiheinen oikosulku. Tässä tapauksessa lähdön 2 sulakkeet ehtivät palaa jo n. 0,35 s kuluessa vian alkamisesta, mutta sinä aikana ehtii tapahtua monia asioita. Muuntamon jännite romahuttaa sen verran alas, että sähkölaatuaseman jännitteen korjaus toimii äärirajalla. Tässä mallissa ei ollut aseteltu hystereesiä tämän kaltaisen rajan yli edestakaisin siirtymisen estämiseksi. Katkaisija aukeaa saarekekäytön aloittamiseksi jännitteenkorjauksen ollessa riittämätön, mutta lähdön 1 kuormituksen pudotessa pois verkosta jännite nousee taas yli asetetun rajan ja katkaisija suljetaan uudestaan. Kuvassa 62 nähdään jännitteessä äkillisiä katkaisijan asennon vaihdosta aiheutuneita häiriöitä. Toisaalta jännitteen heilahduksen rajut piikit yli nollakohdan saattavat sotkea jopa virransyötön tahdistusta, mikä on nähtävissä laatuaseman ulostulon jännitteen heilahdellessa kuvassa 63.



Kuva 62. Viereisen lähdön kolmivaiheisen oikosulun aiheuttama häiriö sähkölaatu-
aseman toiminnassa $t = 0,4$ s alkaen. Rajatapaus jännitten korjaamisessa.

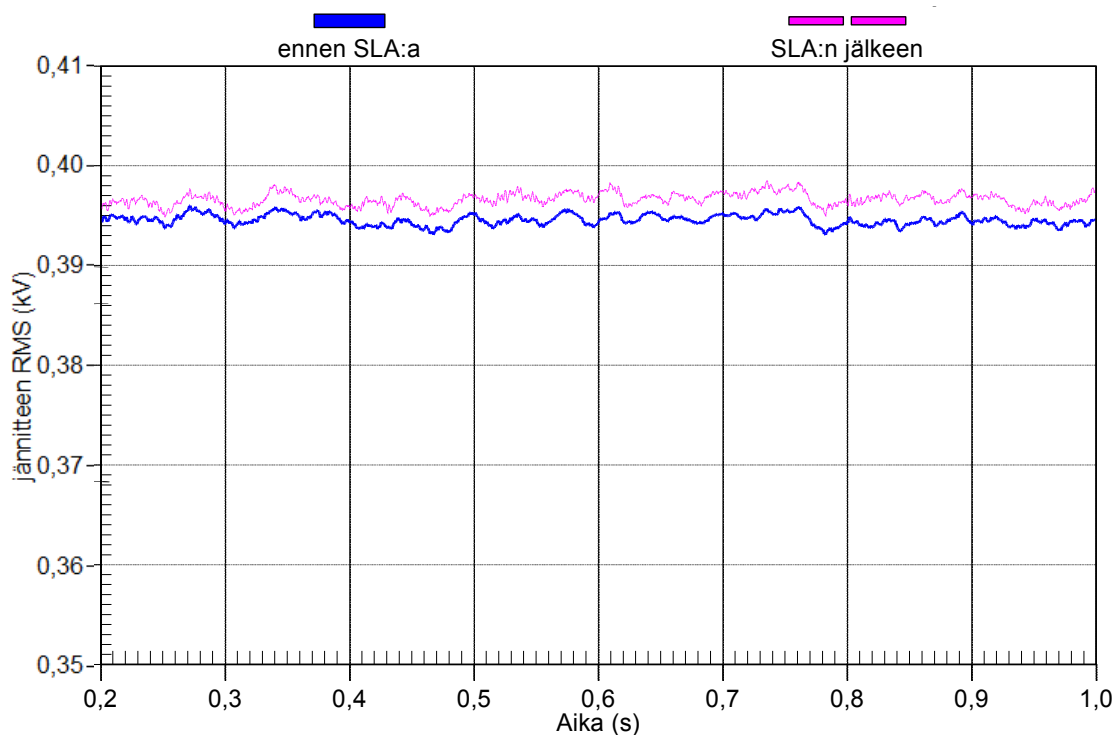


Kuva 63. Hystereesin puuttuminen saarekekäytön katkaisijan ohjauksesta sai aikaan
melkoisen värähtelyn ja laatuaseman toiminnan häiriintymisen.

Tämä ilmiö saadaan helposti poistettua käytännössä lisäämällä katkaisijan ohjaukseen riittävä hystereesi tai lisäksi vielä aikaraja katkaisijan nopeiden edestakaisin asennon vaihtamisen estämiseksi.

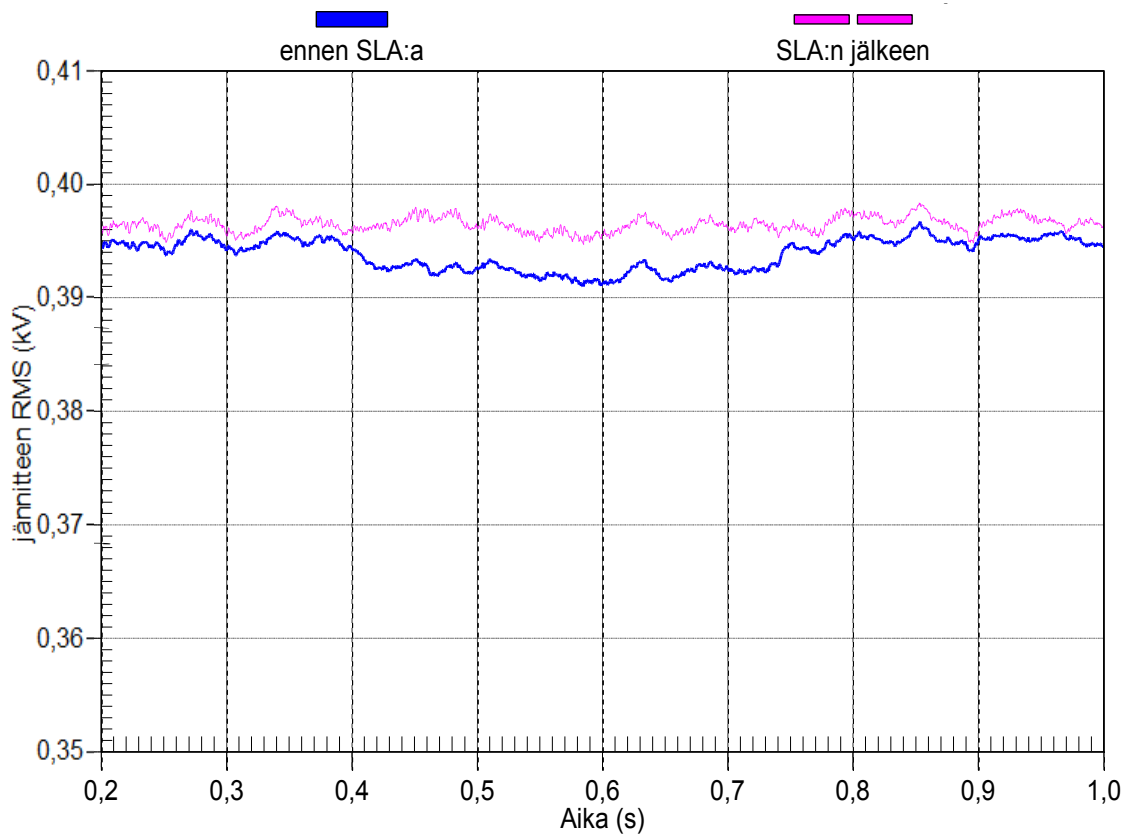
4.3 Viereisen muuntamon viat

Simulaatiossa aiheutettiin vastaavat viat myös viereisen muuntamon yhden lähdön loppupäähän. Yksivaiheinen oikosulku kahden jakelumuuntajan läpi ei juurikaan näy jännitteessä. Kun osaa odottaa vikaa ajan hetkellä $t = 0,4$ s niin hiuksen hienon eron huomaa kuvan 64 jännitetasossa. Sähkönlaatuaseman jännitetaso pysyy jännitteen korjauksen ansiosta tasaisena muuntamon jännitteen notkahtaessa lähes huomaamattoman vähän alaspäin.



Kuva 64. Viereisen muuntamon yksivaiheinen vika on tuskin silmin havaittavissa.

Viereisen muuntamon takana tapahtuva kolmivaiheinen oikosulku näkyy kuvassa 65 sähkönlaatuasemalla jännitetasossa, mutta laatuaseman jälkeinen jännitetaso pysyy korjauksen vaikutuksesta muuttumattomana.



Kuva 65. Viereisen muuntamon takainen kolmivaiheinen oikosulku näkyy jonkin verran sähkönlaatuaseman sisääntulon jännitteessä.

4.4 Yhteenveto sähkönlaatuasemasta

Sähkönlaatuasema toimii pääpiirteittäin suunnitellulla tavalla, eli se pystyy korjaamaan pieniä jännitekuoppia, syöttämään kuorman tarvitsemia virran yliaaltoja sekä toimimaan energiavarastojen avulla myös UPS-laitteen tavoin. Käytännössä saattaa ilmentyä simulaatiossa havaitun kaltaisia vaikeuksia jännitteen ja virran käyrämuotojen yhtäaikaisen korjauksen toteutuksessa. Tätä simulaatiota iteroimalla ja hienosäätämällä voidaan selvittää yksityiskohtaisemmin laatuaseman säätäjien parametrien sopivimmat arvot. Jatkossa integroitaessa energiavaraston yksityiskohtaiset mallit sähkönlaatuaseman jännitevälipiiriin voidaan selvittää tarkemmin superkondensaattoreiden ja mahdollisen akuston tarvittavia kapasiteetteja sekä näiden toimintaa. Perusedellytys tälle on kuitenkin, että niiden lataukselle ja purulle on kehitetty kokonaisuuden toiminnan kannalta mielekkäät ohjaustavat.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa selvitetään simuloimalla ENVADE-hankkeessa kehitettyjen energiavarastokonseptien verkkovaikutuksia. Työkaluna on Pscad, jonka avulla sähköinen järjestelmä yhdessä tarvittavien säätäjien kanssa voidaan kuvata hyvin yksityiskohtaisesti, kuten esimerkiksi kuvissa 24 ja 25 voidaan havaita. Koska kyse on transienttitason työkalusta, useamman sekunnin mittaisten ilmiöiden tarkastelu merkitsee aikaa vievää laskentaa, jopa useiden tuntien ajoja. Nopeammin pitkää aikaväliä koskevat simuloinnit voitaisiin tehdä esim. DigSILENT PowerFactoryllä, jolla voidaan tehdä dynaamiset simuloinnit myös tehollisarvoilla (Pscad laskee aina hetkellisarvoilla). Tällöin kuitenkin menetetään mahdollisuus tarkastella jännitteen ja virtojen käyrämuotoja. Tässä tutkimuksessa tehdyissä Pscad-simuloinneissa simuloitavaa ajanjaksoa rajoittavaksi tekijäksi muodostui tulostiedostojen suuri koko. Teknisesti tämä rajoitus olisi kuitenkin mahdollista kiertää tallentamalla tuloksiin vain tehollisarvoja harvalla tulostuksen aika-askeleella. Tällöin tietenkin käyrämuotojen tutkimiseen tarvittaisiin erilliset simulointiajot.

Tuulivoimalan yhteyteen liitettävää energiavarastoratkaisua tutkitaan vertailemalla erilaisia järjestelmäkoonpanoja. Tulokset ovat odotetunlaisia. Heikkoon verkkoon sijoitettu tuulivoimala pyrkii nostamaan liityntäkohtansa jännitettä ja aiheuttaa siihen nopeita vaihteluita. Jännitteen nousua ja sen vaihteluita pystytään selvästi vähentämään energiavarastoa käyttämällä. Simuloinneissa tutkitaan myös yliaaltojen leviämistä verkkoon. Jotta myös pelkän epätahtigeneraattorin tapauksessa saadaan yliaaltoja näkyviin, liitettiin tuulivoimalan yhteyteen yliaaltopitoinen kuorma. Näin synnytettyjä yliaaltoja saadaan vähennettyä vain tapauksessa, jossa käytössä on aktiivisuodatin. Tällöin kuitenkin ylemmät yliaaltotaajuudet lisääntyivät niin, että jännitteen kokonaissärö (THD) verkon sähköasemalla kasvoi hieman. Mitatut jännitteen yliaallot verkossa ovat kuitenkin alle suositusten kaikissa tapauksissa.

Energiavarastolla varustettu sähkönlaatuasema edustaa uutta ratkaisua, jossa moni yksityiskohta vaatii vielä tarkennuksia ja tämän vuoksi sen mallin toteutuksessakin esiintyi haasteita. Simuloinnit voitiin kuitenkin toteuttaa yhdellä pienjänniteverkon ja

laatuaseman mallit sisältävällä simulointimallilla. Simulointien avulla voidaan demonstroida konseptin kaksi perustavoitetta eli jännitteen ”normalisointi” kohteena olevassa verkon osassa ja yliaaltojen kompensointi syöttävästä verkosta otettavasta virrasta. Toteutetun mallin avulla saadaan esiin myös alustavaa tietoa energiavarastolta edellytettävästä kapasiteetista. Simulointien perusteella konsepti toimii osapuilleen odotetulla tavalla, mutta järjestelmän osien ja säätäjien viritys syöttävän verkon impedanssista riippumattomaksi on tarpeen. Tämä tulee simuloinneissa näkyviin jännitteen särönä. Sähkönlaatuaseman tapauksessa tarkastellaan lyhyitä vikatilanteita, joihin Pscad soveltuu erittäin hyvin.

Vastaavia simulointiprojekteja toteutettaessa on esiarvoisen tärkeää määritellä tarkat rajaukset tarkastelulle sekä halutuille säätäjien ominaisuuksille ja toimintamalleille. Tässä työssä periaatteena on varmentaa mittauksia varten rakennettavan todellisen laboratoriomallin energiavarastojen toiminta todellisessa sähköverkossa simuloimalla. Tällä tavoin tarkoitus olisi verrata simulointituloksia konkreettisen mallin mittaustuloksiin. Tässä työssä edellä mainitun konkreettisen mallin toteutusperiaatteet eivät olleet vielä simulaatioiden suorittamisen aikaan tarkasti selvillä, joten nämä simulaatiotulokset eivät ole suoraan täysin vertailukelpoisia ENVADE-projektissa muualla rakennettavan mittauslaitteiston kanssa. Kuitenkin valtaosa simulaatiomallin kehitystyöstä on jo valmiina, joten näitä malleja voidaan muokata säätimien ohjaustapojen selvittyä haluttuun suuntaan ja suorittaa tarvittavat simulaatio-ajot uudestaan.

Tässä simulaatiotutkimuksessa tuulivoimalan yhteyteen liitettyjä energiavarastoja ladataan ja puretaan siten, että akkuja ladataan ja puretaan asetettujen tehon ylä- ja alarajan perusteella varaustilan mukaan. Superkondensaattoreilla pyritään pehmentämään jäljelle jääneen nettotehon vaihteluita lasketulla liukuvalla keskiarvolla. Verkkoon syötetään tehoa välipiirin jännitteen ohjaamana. Tuulivoimalan yhteyteen lisätty virran yliaaltojen kompensattori lisää verkkovaihtosuuntaajan ohjaukseen mittausten perusteella lasketut yliaaltokomponentit, mikä osaltaan vaikuttaa välipiirin jännitteeseen ja sitä kautta ohjaa verkkoon syötettävää pätötehoa. Tässä kohtaa eri säätäjien aikavakioiden on erityisen tärkeää olla oikeissa suhteissa toisiinsa nähden. Toisaalta koko

ohjauksen ylemmän tason hierargia on syytä miettiä uudestaan alusta asti. Eri energia-varastojen ominaisuudet, kapasiteetit ja varaustilat on syytä ottaa huomioon jo ihan ylimmän tason lataus- ja purkuohjeita suunniteltaessa. Vaihtoehtoisesti alemman tason toteutuksessa on syytä järjestää mahdollisuus pyytää lataus- tai purkuapua toiselta energiavarastolta oman kapasiteetin saavuttaessa äärirajansa.

Nykyään yleistyneillä litium-pohjaisilla akuilla on monia hyviä ominaisuuksia, mitkä tässä simuloituilla lyijyakuilla muodostuvat käytännössä rajoittavaksi tekijäksi. Esimerkiksi litium-akkuja voidaan tyypillisesti ladata ja purkaa lyijyakkuja isommalla virralla, eikä litium-akkujen purkuvirran suuruus vaikuta yhtä paljon ulos saatavaan kapasiteettiin. Tällaisia ratkaisuja on kaupallisesti saatavana jo pienessä omakotitalon mitta-kaavassa, esimerkiksi Tesla Power Wall. Vastaavia rakenteita on olemassa myös suurkontteina, joita voidaan käyttää tässä tutkimuksessa kuvailtuina energiavarastoina. Sähköautojen yleistyttyä 2010-luvun aikana niissä käytetyt litium-akut ovat myös halventuneet valmistusmäärien kasvaessa.

LÄHDELUETTELO

- Abbey, C. & G. Joós (2004). Integration of energy storage with a doubly-fed induction machine for wind power applications, *Power Electronics Specialists Conference*, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, Volume 3, 20–25 June 2004 s. 1964–1968 Vol. 3
- Abbey, C. & G. Joós (2005). Short-term energy storage for wind energy applications, *Industry Applications Conference*, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005, 2–6 Oct. 2005 s. 2035–2042 Vol. 3
- Alanen, R., T. Koljonen, S. Hukari & P. Saari (2003). *Energian varastoinnin nykytila*. VTT tiedotteita 2199, Espoo. 237 s.
- Alanen, R., H. Hätönen (2006). *Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta*, State of art -selvitys. VTT Working Papers 52, Espoo. 85 s.
- Alanen, R., H. Hätönen, J. Kallunki, J. Ikäheimo, O. Knuutila, J. Holma, K. Kauhaniemi, P. Saari & T. Rinne (2006). *Keskikoon energiavarastot hajautetun sähkönjakelun sovelluksissa*. VTT Projektiraportti, VTT-R-03856-06, Espoo. 190 s.
- Fujita, H. & H. Akagi (1996). The unified power quality conditioner: The integration of series active filters and shunt active filters, *27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, PESC '96, Volume 1, 23–27 June 1996, s. 494–501
- Holma J. (2005). *Taajuusmuuttajan välipiiriin liitettävä energianvarastointijärjestelmä*, diplomityö, TKK, 2005. 80 s.
- Hu M. & H. Chen (2000). Modeling and Controlling of Unified Power Quality Compensator, *Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, APSCOM 2000, Hong Kong, October 2000, s. 431–435

- Hätönen H. (2005). *Jakeluverkkoon liitettävä energiavarasto sähkön laadun, jakelun luotettavuuden ja energian hallinnassa*, diplomityö, TKK, 2005. 101 s.
- Kivikko K. (2002). *Keskeytystilastoinnin kehittäminen osana sähkön laadun seuranta*, diplomityö, TTKK, s. 22
- Lee, T.-Y. & N. Chen (1995). Determination of optimal contract capacities and optimal sizes of battery energy storage systems for time-of-use rates industrial customers, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, Volume 10, Issue 3, Sept. 1995 s. 562–568
- Leonhard, W. & M. Grobe (2004). Sustainable electrical energy supply with wind and pumped storage – a realistic long-term strategy or utopia?, *Power Engineering Society General Meeting*, 2004. IEEE, 6–10 June 2004 s. 1221–1225 Vol. 2
- Lund, P.D. & J.V. Paatero (2006). Energy storage options for improving wind power quality, *Nordic wind power conference*, 22–23 May 2006, Espoo, Finland
- Peng, F. Z. (1998). Applicationn issues of active power filters, *Industry Applications Magazine*, IEEE, Volume 4, Issue 5, Sept.–Oct. 1998 s. 21–30
- Ribeiro, P.F., B.K. Johnson; M.L. Crow; A. Arsoy & Y. Liu (2001). Energy storage systems for advanced power applications, *Proceedings of the IEEE*, Volume 89, Issue 12, Dec. 2001 s. 1744–1756
- Strunz, K. & J. Nedrud (2005). Multilevel energy storage for intermittent wind power conversion: computer system analogies. In: *Power Engineering Society General Meeting*, IEEE, 12-16 June 2005 s. 1950–1951 Vol. 2
- Tsai, M.-T., C.-E. Lin, W.-I. Tsai & C.-L. Huang (1995). Design and implementation of a demand-side multifunction battery energy storage system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, Volume 42, Issue 6, Dec. 1995 s. 642–652

- Uusi-Ranta, M. (2001). *Yliaaltojen leviäminen kompensoidussa pienjänniteverkossa*, Vaasan ammattikorkeakoulu, sähkötekniikka, 2001
- Yu, X. & K. Strunz (2004). Combined long-term and short-term access storage for sustainable energy system, *Power Engineering Society General Meeting*, IEEE, 6-10 June 2004, s. 1946–1951 Vol. 2